

Universidad de La Salle

**Ciencia Unisalle**

---

Libros en acceso abierto

Ediciones Unisalle

---

7-2021

**Productos relevantes del proyecto Fortalecimiento de la competitividad del sector floricultor colombiano mediante el uso de ciencia, tecnología e innovación aplicadas en Cundinamarca**

Follow this and additional works at: <https://ciencia.lasalle.edu.co/libros>

---

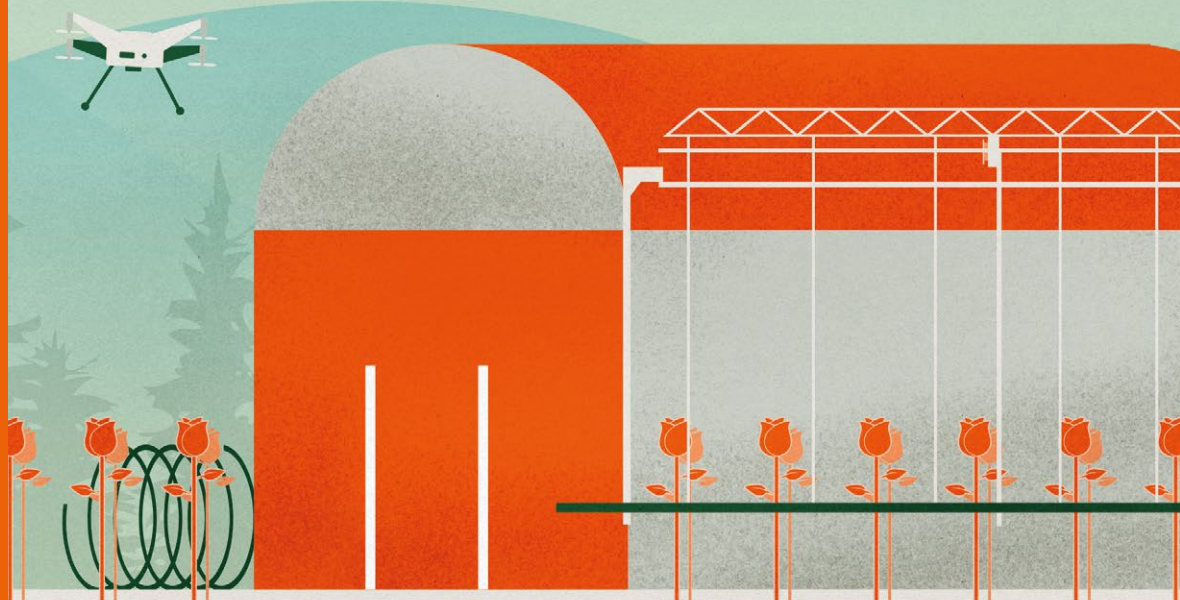
Alternativas de sustratos  
locales y de bajo costo  
acordes con lo requerido  
para la producción  
de flores bajo cubierta

Diseño de una estructura  
de invernadero apropiada  
para las condiciones climáticas  
imperantes al occidente  
de la Sabana de Bogotá

Automatización de  
procesos de aplicación  
de productos fitosanitarios  
y de clasificación de tallos  
florales en poscosecha

# Productos relevantes del proyecto Fortalecimiento de la competitividad del sector floricultor colombiano mediante el uso de ciencia, tecnología e innovación aplicadas en Cundinamarca

VÍCTOR J. FLÓREZ R., editor



UNIVERSIDAD DE  
**LASALLE**

**ceniflores**  
Centro de Innovación de la Floricultura Colombiana

CONTENIDO





2



CONTENIDO



# Productos relevantes del proyecto Fortalecimiento de la competitividad del sector floricultor colombiano mediante el uso de ciencia, tecnología e innovación aplicadas en Cundinamarca

VÍCTOR J. FLÓREZ R., editor

3





Productos relevantes del proyecto Fortalecimiento de la competitividad del sector floricultor colombiano mediante el uso de ciencia, tecnología e innovación aplicadas en Cundinamarca / Víctor J. Flórez R., editor ; Carlos Ricardo Bojacá Aldana [y otros veintidós]. - Primera edición. - Bogotá : Ediciones Unisalle : Ceniflores, 2021.

348 páginas : fotografías, gráficas ; 24 cm

Incluye referencias bibliográficas  
ISBN 978-958-5148-82-6 (impreso)  
ISBN 978-958-5148-83-3 (PDF)

1. Floricultura - Investigaciones - Colombia 2. Floricultura - Innovaciones tecnológicas - Colombia 3. Riego - Investigaciones - Colombia I. Flórez Roncancio, Víctor Julio II. Bojacá Aldana, Carlos Ricardo

CDD: 635.9 ed.22

CEP-Universidad de La Salle. Dirección de Bibliotecas

ISBN: 978-958-5148-82-6  
e-ISBN: 978-958-5148-83-3  
Primera edición:  
Bogotá D. C., julio del 2021

© Autores varios  
Víctor J. Flórez R. - Editor  
© Universidad de La Salle  
© Ceniflores

### Universidad de La Salle

Ediciones Unisalle  
Carrera 5 n.º 59A-44, Ed. Administrativo,  
3.º piso | Bogotá, D. C.  
Tel.: (571) 348 8000, exts.: 1224 – 1226  
[edicionesunisalle@lasalle.edu.co](mailto:edicionesunisalle@lasalle.edu.co)  
<https://ediciones.lasalle.edu.co/>

### Centro de Innovación de la Floricultura Colombiana

Ceniflores  
Cra. 9A n.º 90-53, Bogotá, D. C.  
Tel.: (571) 2579311  
<https://ceniflores.org/>  
[info\\_ceniflores@ceniflores.org](mailto:info_ceniflores@ceniflores.org)

### Edición

Dirección editorial Unisalle  
**Alfredo Morales Roa**

Coordinación editorial Unisalle  
**Andrea del Pilar Sierra Gómez**

Dirección ejecutiva Ceniflores  
**Andrés Sáenz Merino**

Coordinación de proyectos Ceniflores  
**Adriana del Pilar Baracaldo Argüello**

Corrección de estilo  
**Martha Elena Reyes**

Diseño, diagramación e ilustración  
**Book And Play Studio**

Impresión  
**DGP Editores SAS**

Impreso en Bogotá, Colombia.  
Queda prohibida la reproducción total o parcial de este libro por cualquier procedimiento, sin la autorización del titular de los derechos patrimoniales.



# Asocolflores es la Asociación Colombiana de Exportadores de Flores

Creada en 1973 para representar, promover y fortalecer la competitividad de la floricultura colombiana en sus principales mercados y en el país.

## A través de sus cinco pilares:



### Defensa y representación

Representar y defender los intereses legítimos de la floricultura a nivel nacional e internacional.



### Información para la acción y toma de decisiones

Ofrecer a nuestros asociados cifras, hechos, datos y tendencias del contexto económico, logístico, social y medioambiental.



### Sostenibilidad

Potenciar el impacto positivo económico, social y ambiental de la floricultura, como herramienta de gestión y cultura empresarial.



### Innovación

Desarrollar nuevas estrategias y procesos, a través de la generación de conocimiento, que favorezcan la competitividad.



### Mercadeo

Posicionar las flores colombianas a través de estrategias de promoción, comunicación y visibilización que beneficien a todos nuestros asociados.

**asocolflores**

Asociación Colombiana de Exportadores de Flores



**ceniflores**

Centro de Innovación de la Floricultura Colombiana

## Somos un articulador de innovación

El **triángulo de la innovación** es la forma como CENIFLORES articula al sector privado, la academia y el gobierno en pro de mejorar el estado actual de innovación e investigación de las flores frescas cortadas en Colombia.



[www.ceniflores.org](http://www.ceniflores.org)



@ceniflores\_



@ceniflorescolombiana



@ceniflores

### 1. Sector privado



2. Academia



3. Gobierno





# Contenido

---

## CAPÍTULO 1

Diseño, construcción y evaluación de un invernadero para el cultivo de flores de corte en las condiciones del occidente de la Sabana de Bogotá

*Carlos Ricardo Bojacá Aldana y  
Edwin Andrés Villagrán Munar*

{12}

---

## CAPÍTULO 2

Evaluación funcional y aplicación de fertirriego en sustratos

*Carlos Alberto González-Murillo, Andrea López-Zuluaga,  
María Fernanda Quintero Castellanos y  
Víctor Julio Flórez Roncancio*

{48}

---

## CAPÍTULO 3

Prototipo de sistema de fertirriego para investigación en ornamentales

*César Augusto Navarro Salgado,  
Carlos Alberto González-Murillo, Ricardo Isaza Ruget  
y Víctor Julio Flórez Roncancio*

{98}

---

## CAPÍTULO 4

Optimización en el uso del nitrógeno en la fórmula de fertirriego en clavel

*Adriana del Pilar Baracaldo Argüello,  
Manfred Camilo Díaz Ortiz y  
Víctor Julio Flórez Roncancio*

{124}

---

## CAPÍTULO 5

Automatización de la aplicación de productos fitosanitarios en flores de corte

*Jairo Orlando Montoya Gómez,  
José Luis Rubiano Fernández, Jorge Eliécer Rangel Díaz  
y Pedro Fernando Martín Gómez*

{166}

---

## CAPÍTULO 6

Efecto de mallas fotoselectivas en la  
fluctuación poblacional de adultos de mosca  
blanca en plantas de alstroemeria

*Angélica María Pardo Pardo, William Javier Cuervo Bejarano,  
Ferdy Alfonso Alvarado Montoya, Sandra Esperanza  
Melo Martínez y Edison Torrado León*

{196}

---

## CAPÍTULO 7

Manipulación del ambiente lumínico en cultivos en  
invernadero.  
Caso mallas fotoselectivas de colores en alstroemeria  
en la Sabana de Bogotá

*William Javier Cuervo Bejarano, Angélica María  
Pardo Pardo y Víctor Julio Flórez Roncancio*

{218}

7

---

## CAPÍTULO 8

Fundamentos de la floración mediada por luz y  
potencialidades de las mallas fotoselectivas y huellas  
espectrales en floricultura

*María Camila Páez Olarte, Víctor Julio Flórez  
Roncancio y Joaquín Guillermo Ramírez -Gil*

{254}

---

## CAPÍTULO 9

Automatización y control en procesos de  
clasificación y empaque en flores de corte

*Jairo Orlando Montoya Gómez, Jorge Eliécer Rangel Díaz,  
Pedro Fernando Martín Gómez y José Luis Rubiano Fernández*

{298}

---

## CAPÍTULO 10

Resultados de apropiación social de la ciencia,  
la tecnología y la innovación en el sector  
floricultor de Cundinamarca

*Carlos Eduardo Rodríguez Muñoz y  
Nelly Yolanda Russi Quiroga*

{330}





# Presentación

**Este libro es uno de los resultados relevantes** del proyecto *Fortalecimiento de la competitividad del sector floricultor colombiano mediante el uso de ciencia, tecnología e innovación aplicadas en Cundinamarca*. En este proyecto, la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, la Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, la Universidad de La Salle, el Centro de Innovación de la Floricultura Colombiana (Ceniflores), la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia), con el liderazgo de la Asociación Colombiana de Exportadores de Flores (Asocolflores), accedieron a recursos del Sistema General de Regalías, a través de la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Gobernación de Cundinamarca. El objetivo: abordar temas de investigación requeridos para el desarrollo de la ciencia y la tecnología en el sector floricultor colombiano, así como para la formación de talento humano.

El desarrollo de todas las temáticas presentadas en este documento se basó en el talento humano local. En particular, se diseñó una estructura de invernadero apropiada para las condiciones climáticas imperantes al occidente de la Sabana de Bogotá, y se buscaron alternativas de sustratos locales y de bajo costo que cumplieran con parámetros de caracterización física y química acordes con lo requerido por los sistemas de cultivo sin suelo desarrollados para la producción bajo cubierta. De igual forma, se diseñó un prototipo de fertirriego en el que fuera viable hacer investigación en horticultura en áreas pequeñas, con la consecuente disminución de costos de infraestructura de investigación. También se buscó reducir el impacto ambiental de las soluciones salinas que contienen nitrógeno, disminuyendo su aporte o reemplazando la forma de su aplicación nitríca por amoniacal, con miras a hacer más amigable la actividad de la producción de tallos florales con el medio ambiente.

En temas de formación de talento humano, se incurrió en soluciones que a primera vista están resueltas en los países desarrollados, pero que para las condiciones locales constituyen verdaderos retos tecnológicos, como la automatización de procesos de aplicación de productos fitosanitarios y de procesos de clasificación en poscosecha. Además, se llevó a cabo una investigación acerca de cómo la modificación del ambiente luminoso con mallas fotoselectivas afectaba el desarrollo de las plantas y el comportamiento de plagas, en particular el de la mosca blanca en alstroemeria.

Con todo lo anterior, y centrada en los cultivos de rosa, clavel y alstroemeria, se pone a disposición de los floricultores, horticultores, académicos e interesados en general, una publicación de la más alta calidad técnica, científica y editorial. En esta iniciativa del sector público y privado, con el liderazgo del gremio y el apoyo de la empresa privada, se tiene un claro ejemplo de la eficiente y fructífera aplicación de recursos públicos en el desarrollo de un sector de avanzada para la economía del país.

El editor de esta obra agradece a los profesores de las diferentes universidades que lideraron los proyectos, a las compañías Brenntag Colombia S.A., Avgust Colombia SAS, Hilverda Florist, Oleaginosas San Marcos, Productos Químicos Andinos SAS y Rosen Tantau por sus valiosos e imprescindibles aportes en especie; a todas las entidades que de una u otra forma se hicieron presentes en la ejecución de los diversos proyectos; al doctor Raúl I. Cabrera, profesor de Rutgers University (Estados Unidos), por sus valiosos aportes; a los delegados de las empresas productoras de flores que se hicieron presentes durante el desarrollo de los proyectos, así como a aquellos que aportaron con asistencia técnica al proyecto, cuyas sugerencias lo enriquecieron. En especial, gratitud a los estudiantes de las universidades vinculadas, que con su esmero y entrega característicos hicieron realidad la ejecución de esta magna apuesta.







Nueva

# Especialización Tecnológica en Horticultura Protegida

La Especialización tiene como objetivo complementar la formación de técnicos y profesionales del sector agrícola en las técnicas actuales de producción bajo invernadero y su optimización.

SNIES 109031. Registro Calificado: Resolución 16201 de 18/12/2019 vigente por 7 años. Duración: 2 semestres. Bogotá. Presencial.

## Acreditación Institucional de Alta Calidad

Resolución No. 04624 del 21 de marzo de 2018 - Vigencia 6 años

### Datos de contacto del programa

PBX: (+57 1) 242 7030 – Ext. 2400 y 3500  
especializacion.horticultura@utadeo.edu.co  
[www.utadeo.edu.co](http://www.utadeo.edu.co)

Carretera Central del Norte, 3 kms al norte  
del Puente de La Caro, Chía (Cundinamarca)  
Centro de Bio Sistemas, Colombia



# 1

## CAPÍTULO





# Diseño, construcción y evaluación de un invernadero para el cultivo de flores de corte en las condiciones del occidente de la Sabana de Bogotá\*

Carlos Ricardo Bojacá Aldana<sup>1</sup> y Edwin Andrés Villagrán Munar<sup>2</sup>

## RESUMEN

13

En Colombia, la producción de flores de corte se desarrolla en invernaderos de plástico ventilados de forma natural, lo que a veces conduce a microclimas inapropiados con altas temperaturas y humedad que limitan el desarrollo de las plantas. Con el objetivo de revertir esta tendencia, se diseñó, construyó y evaluó a escala real un nuevo prototipo de invernadero teniendo como consignas de diseño el incremento de la altura del invernadero, así como el aumento de las áreas de ventilación cenital reconociendo el contexto económico de la producción de flores en el país. El invernadero se diseñó mediante dinámica de fluidos computacional (CFD), la cual permitió evaluar diferentes diseños en función de las condiciones climáticas del occidente de la Sabana de Bogotá. El invernadero de 4704 m<sup>2</sup> se construyó a escala real en el Centro Agropecuario Marengo de la Universidad Nacional de Colombia,

\* Para citar este capítulo: Bojacá A., C.R. y E.A. Villagrán M. 2021. Diseño, construcción y evaluación de un invernadero para el cultivo de flores de corte en las condiciones del occidente de la Sabana de Bogotá. En: Flórez R., V.J. (ed.). Productos relevantes del proyecto Fortalecimiento de la competitividad del sector floricultor colombiano mediante el uso de ciencia, tecnología e innovación aplicadas en Cundinamarca. Ediciones Unisalle, Ceniflores, pp. 12-45.

1. Ingeniero agrónomo, Universidad Nacional de Colombia. Doctor en Ingeniería en Biociencias, Universidad de Lovaina. Profesor titular del Departamento de Ciencias Básicas y Modelado, Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería, Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Bogotá. Correo electrónico: carlos.bojaca@utadeo.edu.co - orcid: 0000-0003-0230-326x.

2. Ingeniero agrícola, Universidad Nacional de Colombia. Estudiante de doctorado en Ciencias Ambientales y Sostenibilidad, Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería, Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Bogotá. Correo electrónico: edwina.villagranm@utadeo.edu.co - orcid: 0000-0002-7996-4966.



en Mosquera (Cundinamarca). El comportamiento climático del invernadero se evaluó con respecto a las condiciones climáticas externas y contra el microclima de un invernadero de diseño tradicional ubicado en cercanías al sitio de instalación del prototipo. Las simulaciones indicaron que la mayor homogeneidad de temperatura dentro del invernadero se logra a medida que aumentan tanto las áreas de ventilación como las velocidades del aire. El diseño final incluyó la orientación alternada de las naves en el prototipo para permitir la entrada y la salida de aire por cualquiera de las ventanas dependiendo de la dirección del viento. De igual manera, la adición de un deflector vertical permite un mayor intercambio de aire en el área de cultivo. Comparativamente, el prototipo propuesto redujo los saltos térmicos y aumentó el número de veces que se renueva el aire interior en comparación con lo observado para el invernadero tradicional.

**Palabras clave:** *dinámica de fluidos computacional, microclima, tasa de ventilación, ventilación pasiva, volúmenes finitos.*

## ABSTRACT

**In Colombia, cut flower production** takes place in naturally ventilated plastic greenhouses, sometimes leading to inappropriate microclimates with high temperatures and humidity that constrain plant development. In order to reverse this trend, a new greenhouse prototype was designed, built and evaluated on a real scale, with the design principles of increasing the height of the greenhouse as well as increasing the rooftop ventilation areas, while recognizing the economic context of cut flower production in the country. The greenhouse was designed using computational fluid dynamics (CFD), which allowed to evaluate different designs depending on the climatic conditions of the western Bogotá Plateau. The 4704 m<sup>2</sup> greenhouse was built on a real scale at the Centro Agropecuario Marengo of the Universidad Nacional de Colombia, at Mosquera (Cundinamarca). The climatic behavior of the greenhouse was evaluated with respect to the external climatic conditions and against the microcli-

mate of a traditional greenhouse design located near the site of installation of the prototype. The simulations indicated that greater homogeneity of temperature within the greenhouse is achieved as both ventilation areas and air velocities increase. The final design included the alternate orientation of the spans in the prototype to allow both the entry and exit of air through any of the vents depending on the direction of the wind. Similarly, the addition of a vertical deflector allows for greater air exchange at the crop area level. Comparatively, the proposed prototype reduced the thermal jumps and increased the number of times the indoor air is renewed compared to that observed for the traditional greenhouse.

**Keywords:** *computational fluid dynamics, microclimate, ventilation rate, passive ventilation, finite volumes.*



# Introducción

Los invernaderos de plástico se han convertido en la opción predominante para el cultivo protegido en climas de invierno suave y otras regiones cálidas del mundo (Castilla, 2002). A pesar de sus variaciones, los invernaderos de plástico se caracterizan por ser estructuras de bajo costo, pasivamente ventiladas y sin calefacción, con un uso mínimo o nulo de sistemas activos de control climático (Tuzel *et al.*, 2017). Estos invernaderos dependen en gran medida del clima exterior, por lo que el control climático se limita a regular el intercambio de aire con el exterior a través de las áreas de ventilación.

En Colombia, las flores de corte se cultivan en invernaderos pasivos, donde la estrategia de control climático se basa exclusivamente en el uso del fenómeno de la ventilación natural, que, al ser un método simple y eficiente de control climático, es económicamente viable (Lee *et al.*, 2018). La ventilación natural sigue siendo muy utilizada en invernaderos de países como España, China, México y Colombia (McCartney y Lefsrud, 2018). Este fenómeno depende de dos fuerzas: la convección forzada o la ventilación dinámica causada por la acción del viento exterior, y la convección libre o la ventilación térmica provocada por la flotabilidad debida a las diferencias de temperatura entre el exterior y el interior del invernadero (Espinoza *et al.*, 2017).

Aunque se pueden encontrar diferentes tipos de estructuras en las zonas de producción en invernadero en Colombia, todas ellas funcionan bajo el mismo principio de ventilación. A lo largo del techo a dos aguas, existe una abertura fija que permite el intercambio permanente de aire con el exterior. De igual manera, hay presencia de ventilaciones laterales móviles en las paredes del invernadero, las cuales permiten algún grado de control de las condiciones climáticas. Estas ventilaciones laterales se abren durante el día, y en la noche se cierran por completo.

Desde comienzos del presente siglo, Cooman (2002) resaltaba cómo durante los últimos 30 años de desarrollo de la industria de flores, la tecnología de invernaderos ha permanecido prácticamente igual desde el punto de vista de



climatización. Los invernaderos construidos localmente son económicos, cuando se comparan con las construcciones de otras latitudes; sin embargo, el control de clima que ofrecen es mínimo. El mismo autor señala que la falta de control contrasta con los principios de manejo de los bioprocesos que deben existir en horticultura protegida, donde el microclima es optimizado por medio de estructuras de invernadero apropiadas, equipos y sistemas de control. Hoy en día estos postulados siguen siendo básicamente los mismos en la medida en que no se ha dado una evolución significativa en el tema de climatización, salvo experiencias puntuales de algunas empresas.

Acuña *et al.* (2004) realizaron lo que se puede considerar la primera caracterización a gran escala de los invernaderos para cultivos de flores de la Sabana de Bogotá. Esta caracterización reveló la amplia utilización del invernadero tradicional con apertura fija en la cumbre, ventilaciones laterales móviles mediante cortinas enrollables, estructura en madera y material de cubierta plástico. Algunas de las conclusiones de esta caracterización, realizada sobre 2007,8 hectáreas, fueron: las necesidades de ventilación cenital que requieren estos invernaderos debido a los bajos porcentajes de ventilación actuales, el aumento en las pendientes longitudinales que se ha venido dando para los últimos diseños instalados y la poca variación de estos invernaderos en cuanto a su altura mínima, largo y ancho de nave.

La ventilación afecta la temperatura interior del invernadero de tal manera que en momentos de altas radiaciones es necesario hacer circular el aire desde el exterior hacia el interior del invernadero de forma homogénea para controlar los excesos de temperatura. Este movimiento del flujo de aire también debe permitir el intercambio de masa y calor entre las plantas de cultivo y el aire que circula en el invernadero (He *et al.*, 2017). La ventilación natural controla el exceso de humedad y mantiene los niveles de CO<sub>2</sub> en rangos cercanos al nivel presente en la atmósfera, lo que no limita el proceso de fotosíntesis en las plantas (Molina-Aiz *et al.*, 2017).

Durante las últimas décadas, la mejora del microclima en los invernaderos de plástico ha llamado la atención de



Los invernaderos utilizados para la producción de flores en Colombia son naturalmente ventilados, es decir, el microclima interno es función directa de las condiciones climáticas externas.



los investigadores de todo el mundo debido a la necesidad de optimizar las condiciones en las que se cultivan las plantas dentro de estas estructuras. La investigación se ha centrado principalmente en el estudio de las configuraciones de las ventilaciones de las paredes laterales y del techo para mejorar su diseño en términos de dimensiones y posición (He *et al.*, 2015; Molina-Aiz *et al.*, 2006; Bartzanas *et al.*, 2004; Kacira *et al.*, 1998).

En la actualidad, el modelamiento de fenómenos complejos como la ventilación natural de invernaderos es posible gracias a la creciente potencia de procesamiento de los computadores y al desarrollo de técnicas numéricas avanzadas. La dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) es una herramienta que permite simular sistemas de flujo de fluidos, así como la interacción del fluido con cuerpos sólidos mediante la resolución de ecuaciones de movimiento de fluidos (Blazek, 2015). A nivel mundial, la CFD se ha convertido en la herramienta preeminente para modelar y diseñar sistemas de ventilación mediante simulaciones realistas del flujo de aire interior, la masa y la transferencia de calor en invernaderos (Norton *et al.*, 2007).

El objetivo de este trabajo consistió en evaluar un prototipo a escala real de un modelo de invernadero optimizado climáticamente para la producción de flores de corte y en función de las condiciones climáticas del occidente de la Sabana de Bogotá, empleando para tal fin la herramienta de modelado y simulación CFD.

## 1.1 Materiales y métodos

### 1.1.1 Diseño del invernadero

El diseño del invernadero se llevó a cabo mediante herramientas de modelado y simulación, lo cual contribuyó a la reducción en los tiempos de desarrollo y evaluación de las alternativas. El invernadero se diseñó teniendo en cuenta las siguientes consignas:

- El invernadero debe tener una altura mayor a la de las estructuras que tradicionalmente se han empleado para la producción de flores. Esto con el fin de favorecer el efecto chimenea dentro del invernadero, de manera que mejore la circulación y renovación del aire interior.
- El invernadero debe contar con áreas de ventilación cenital más grandes y en ambos sentidos. De esta forma se mejora la tasa de renovación de aire interior aprovechando el viento en la dirección que se presente y dando un mayor peso a la ventilación cenital en comparación con la ventilación lateral.
- Las mejoras propuestas al invernadero deben ser razonables dentro de lo que el floricultor local está en capacidad de incorporar a su modelo de negocio. Aunque existen alternativas tecnológicamente superiores, estas están lejos de ser adoptadas en el medio local en razón a su elevado costo.

Con base en estas consignas generales y experiencias pasadas en la temática (Villagrán y Bojacá, 2017; Villagrán *et al.*, 2012), se procedió a diseñar diferentes geometrías de invernaderos, las cuales fueron evaluadas empleando CFD. El desarrollo de simulaciones mediante CFD sigue una serie de pasos metodológicos entre los que se cuentan inicialmente la definición del dominio computacional, la división de dicho dominio en un número finito de subdominios, la definición de las propiedades del fluido y de las condiciones de frontera. Luego, en la etapa de proceso, se realiza la solución numérica de las ecuaciones que definen el comportamiento del fluido, y se aproximan las propiedades de flujo en función de los escenarios de simulación considerados. Con la información resultante del comportamiento del fluido para cada una de las simulaciones, se lleva a cabo una evaluación cualitativa y cuantitativa a fin de establecer el diseño de invernadero que mejor se comporta en función de los requerimientos preestablecidos.



**El diseño del invernadero se optimizó bajo las premisas de incremento de altura y aumento de las áreas de ventilación cenital considerando alternativas viables de acuerdo con las condiciones técnicas y económicas del sector.**



### 1.1.2 Diseño mediante modelado asistido por computador

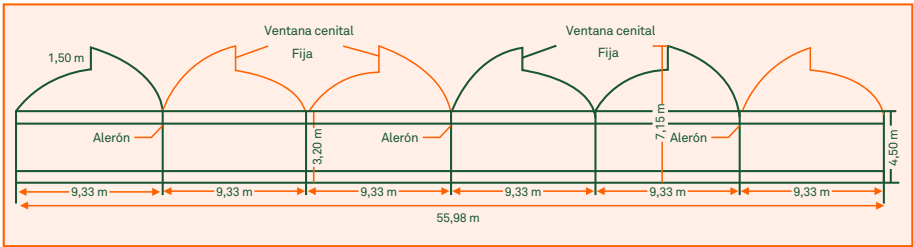
El primer paso para realizar el modelado mediante CFD de un invernadero consiste en definir la geometría del invernadero. A partir de experiencias previas y con base en consignas de diseño se seleccionó la geometría que se observa en la figura 1.1 para representar el prototipo de invernadero. Este diseño de invernadero es de mayor altura y área que los invernaderos tradicionales y presenta áreas de ventilación cenital en ambos sentidos.

### 1.1.3 Generación de malla

El método seleccionado de solución de flujo del fluido fue el de volúmenes finitos, en el que el resultado se obtiene mediante la discretización e integración de las ecuaciones de transporte a través de la división del dominio computacional en una malla no estructurada. El paso inicial para el desarrollo de este trabajo consistió en la creación de un modelo geométrico que representara la sección transversal del invernadero estudiado. Este modelo se utilizó para realizar análisis del comportamiento del flujo de aire y de la temperatura en el interior del invernadero. La sección transversal fue incluida dentro de un dominio computacional de gran tamaño (altura de 50 m  $\times$  longitud de 255 m).

El dominio computacional estuvo compuesto por una malla de elementos cuadrados dividida en 465 800 celdas,

➔ **Figura 1.1** Esquema de la fachada del invernadero seleccionado mediante CFD como propuesta de invernadero adaptado a las condiciones climáticas de la zona occidental de la Sabana de Bogotá.





y se construyó empleando el paquete de cómputo Ansys (v.17.0). Un criterio fundamental para establecer la precisión de las soluciones obtenidas mediante CFD consiste en evaluar la calidad de la malla. Los parámetros de calidad evaluados fueron el tamaño de las celdas y la variación del tamaño de celda a celda; se encontró que un 98,8 % de las celdas de la malla estaban dentro del intervalo de calidad alta (0,95-1). También se evaluó el *ortogonal quality*, donde el valor mínimo obtenido fue de 0,94, resultado que se clasificó dentro del rango de alta calidad.

### 1.1.4 Condiciones de frontera

El límite izquierdo del invernadero se estableció como la entrada de aire al dominio computacional, considerando un perfil uniforme de velocidad del viento y evaluando velocidades por debajo de valores de  $0,6 \text{ m s}^{-1}$ . Este rango de valores de velocidad del viento es el predominante en la zona de estudio para las horas evaluadas, y fue determinado a partir de la caracterización climática realizada con datos históricos registrados durante un periodo de seis años.

El límite derecho se fijó como la salida de presión de aire del dominio computacional. La parte superior del dominio fue especificada con condiciones de frontera de propiedades simétricas para no generar pérdidas de fricción del flujo de aire en contacto con esta superficie. Las simulaciones tuvieron en cuenta las características atmosféricas del municipio de Mosquera, en Cundinamarca (2516 msnm), junto con otras condiciones de frontera relevantes presentadas en la tabla 1.1. La parte inferior del dominio se consideró como suelo, y a la estructura del invernadero se le fijó una condición de frontera de pared teniendo presente para ello las propiedades físicas y térmicas del polietileno. El modelo no incluyó cultivo alguno y, adicionalmente, se asumió una hermeticidad máxima del invernadero. Estas simplificaciones son válidas puesto que son aplicadas a cada uno de los casos simulados, y los errores que puedan derivarse tendrán el mismo grado de magnitud para cada escenario.



El diseño de invernaderos empleando herramientas de modelado y simulación como la Dinámica de Fluidos Computacional permite evaluar diferentes alternativas de forma rápida y económica.



➔ **Tabla 1.1** Valores de las condiciones de frontera empleadas para realizar las simulaciones del diseño de invernadero seleccionado.

CONDICIÓN		VALOR	
Presión atmosférica		74 660 Pa	
Fuerza de la gravedad		9,81 m s <sup>-2</sup>	
Viscosidad del aire		1,7e-05 kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>	
MATERIAL	DENSIDAD ( $\rho$ , kg m <sup>-3</sup> )	CONDUCTIVIDAD (k, W m-K <sup>-1</sup> )	CALOR ESPECÍFICO (Cp, J kg-K <sup>-1</sup> )
Suelo	1300	1,0	800
Polietileno	923	0,38	2300
Aire	1,225	0,0242	1006,43

### 1.1.5 Procedimiento numérico

Las ecuaciones de Navier-Stokes fueron resueltas mediante la utilización del *software* comercial Ansys Fluent (v. 17.0). La naturaleza turbulenta del flujo de aire se simuló utilizando el modelo de turbulencia estándar k- $\epsilon$ , el cual se basa en dos ecuaciones principales: una para k, que representa la energía cinética, y otra para  $\epsilon$ , que representa la tasa de disipación en tiempo y volumen unitarios. Este modelo ha sido el más utilizado y validado en estudios enfocados a invernaderos demostrando una precisión adecuada. Todas las simulaciones consideraron la ecuación de energía, lo cual permitió analizar el campo escalar de temperaturas dentro del invernadero. Así mismo, la aproximación de Boussinesq fue tomada en cuenta con el fin de evaluar el fenómeno de flotabilidad del aire.

### 1.1.6 Escenarios considerados

Una vez definida la geometría del diseño seleccionado, se realizó una serie de simulaciones orientadas a conocer el comportamiento de las propiedades del aire interno en diferentes condiciones de velocidad y dirección del viento, en combinación con diferentes manejos de las ventilaciones laterales y cenitales. En la tabla 1.2 se presentan los escenarios

➔ **Tabla 1.2** Descripción de las simulaciones realizadas mediante CFD considerando la configuración de ventilación (VL: ventilación lateral, VC: ventilación cenital), su grado de apertura (100 %: ventilación completamente abierta) y la dirección y velocidad del viento para el diseño de invernadero seleccionado.

SIMULACIÓN	DESCRIPCIÓN	ESQUEMA
S1	VL: 0 %, VC: 100 % Velocidad del viento: 0,1; 1; 1,3; 2 y 5 m s <sup>-1</sup> Dirección del viento: N-S	
S2	VL: 25 %, VC: 100 % Velocidad del viento: 0,1; 1; 1,3; 2 y 5 m s <sup>-1</sup> Dirección del viento: N-S	
S3	VL: 50 %, VC: 100 % Velocidad del viento: 0,1; 1; 1,3; 2 y 5 m s <sup>-1</sup> Dirección del viento: N-S	
S4	VL: 75 %, VC: 100 % Velocidad del viento: 0,1; 1; 1,3; 2 y 5 m s <sup>-1</sup> Dirección del viento: N-S	
S5	VL: 100 %, VC: 100 % Velocidad del viento: 0,1; 1; 1,3; 2 y 5 m s <sup>-1</sup> Dirección del viento: N-S	

23

de simulación considerados para evaluar el invernadero propuesto mediante CFD.

La simulación de estos escenarios está orientada a evaluar el comportamiento del aire dentro del invernadero en diferentes condiciones de manejo. Estas simulaciones en dos dimensiones permiten analizar variables que definen el clima interno dentro del invernadero, como temperatura, velocidad y dirección del aire. Los contornos de estas variables dentro del invernadero hacen posible analizar de manera espacial los movimientos internos del aire en función de las condiciones climáticas externas y del manejo que se haga de las ventilaciones.

### 1.1.7 Evaluación del prototipo a escala real

Como resultado de las simulaciones numéricas del comportamiento de la ventilación del invernadero fue posible

construir un prototipo a escala real, cuyas características se describen en la tabla 1.3. El invernadero se construyó durante el primer semestre del año 2017 en las instalaciones del Centro Agropecuario Marengo (CAM) de la Universidad Nacional de Colombia, ubicado en el municipio de Mosquera, Cundinamarca (figura 1.2). Este prototipo a escala real se evaluó desde el punto de vista climático para validar los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas mediante CFD.

La evaluación climática consistió en comparar el comportamiento promedio del clima interno del invernadero con respecto al clima externo. La comparación del comportamiento climático del invernadero con respecto a las condiciones climáticas externas se realizó mediante la comparación de los promedios a escala horaria de las variables climáticas seleccionadas tanto en el interior como en el exterior del invernadero. Para tal fin, en el ambiente externo del invernadero se registraron temperatura y humedad del aire, así como velocidad y dirección del viento, por medio de una estación meteorológica Vantage Pro2 (Davis Instruments, Hayward, CA, USA). En la zona central del invernadero, a una altura de 2 m del suelo, se instalaron un par de termocuplas, para medir las temperaturas de bulbo húmedo y seco; las



El diseño  
seleccionado  
mediante  
modelado y  
simulación fue  
construido a escala  
real manteniendo  
unas dimensiones  
comerciales para  
su evaluación  
climática.

➔ **Tabla 1.3** Características constructivas del invernadero prototipo.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Área (m <sup>2</sup> )	4704
Ancho total (m)	56
Longitud total (m)	84
Número de naves	6
Ancho de la nave (m)	9,3
Altura mínima bajo la canal (m)	4,6
Altura máxima bajo la canal (m)	7,9
Altura mínima en la cumbrera (m)	7,8
Altura máxima en la cumbrera (m)	11,1
Altura de la ventilación cenital (m)	1,5
Altura de las ventilaciones laterales (m)	3,9



lecturas se almacenaron en un registrador de datos (Cox-Tracer Junior, Escort dls, Edison, NJ, USA).

El comportamiento en campo de la ventilación cenital en el invernadero propuesto se evaluó por medio de anemómetros sónicos (WindMaster, Gill Instruments, UK), instalados en una de las ventilaciones centrales del invernadero. En razón a que la orientación de las naves en el invernadero prototipo es alternada, se ubicó un anemómetro en un par de ventilaciones cenitales dispuestas de manera opuesta. De esta manera, la información se registró para una ventilación cenital orientada en dirección barlovento y para otra orientada en dirección sotavento.

Adicional a esta comparación, también se buscó contrastar el comportamiento del invernadero propuesto con respecto a un invernadero tradicional, lo cual fue posible mediante el registro de las mismas variables climáticas dentro de un invernadero de diseño tradicional ubicado en las cercanías del CAM. En este caso, también se ubicó un par de termocuplas en la zona central del invernadero, a una altura de 2 m del suelo dentro de una cápsula ventilada, acopladas a un registrador de datos (Cox-Tracer Junior, Escort dls,

25

➔ **Figura 1.2** Vistas internas y externas del prototipo de invernadero a escala real construido en el Centro Agropecuario Marengo de la Universidad Nacional de Colombia, en el municipio de Mosquera, Cundinamarca.



Edison, NJ, USA). Las dos termocuplas, actuando como bulbo seco y húmedo, permitieron establecer temperatura, humedad relativa y déficit de presión de vapor en el interior de los invernaderos.

Esta comparación cualitativa posibilitó establecer un patrón general sobre las diferencias en el comportamiento del prototipo propuesto en relación con el invernadero de diseño tradicional; lo anterior, a pesar de que los invernaderos difirieran en sus dimensiones y en el manejo particular de las ventilaciones. Dentro de estas comparaciones se calcularon los promedios para las 24 h, las horas del día (6:00 a 18:00 h) y las horas de la noche (18:00 a 6:00 h). El registro de la información de campo empleado para esta evaluación se realizó durante el año 2017.

## 1.2 Resultados relevantes

### 1.2.1 Simulaciones CFD



**El aumento en las áreas de ventilación favoreció la renovación del aire interno del invernadero a tasas que igualan o superan los valores recomendados en la literatura.**

Los resultados de las simulaciones realizadas mediante CFD descritas en la tabla 1.2 están representadas en mapas de contorno (anexo 1.1) que describen el comportamiento de las variables velocidad y temperatura del aire. En la medida en que ocurre una mayor apertura de las áreas de ventilación, se promueve el intercambio de aire con el ambiente externo, incrementando los valores de tasas de intercambio de aire. En el mismo sentido, el aumento progresivo de la velocidad del viento favorece el intercambio y la renovación del aire con el ambiente externo, lo cual mejora el comportamiento climático interno del invernadero.

La mayor homogeneidad de temperatura dentro del invernadero se va logrando en la medida en que aumentan las áreas de ventilación y las velocidades del aire. Obtener una mayor homogeneidad del clima dentro del área de cultivo se traduce en un crecimiento más homogéneo de las plantas, disminuyendo gradientes de productividad o calidad.

La orientación alternada de las naves en el invernadero prototipo permite la entrada y la salida de aire por cualquiera de las ventanas, dependiendo de la dirección en que esté entrando el viento. De igual manera, la presencia del deflector vertical en las naves del invernadero cumple con el objetivo de lograr un mayor intercambio de aire en el área de cultivo, tal como lo presentan las simulaciones CFD. Este efecto se potencia a medida que aumenta la velocidad del aire.

Entre los resultados de las simulaciones realizadas está el cálculo del índice horario de renovación de aire para el diseño seleccionado. Este índice de renovación ( $N$ ) indica el número de veces que se renovaría el aire en el invernadero como resultado del proceso de ventilación pasiva a que se somete la estructura; está definido en función del volumen de aire encerrado dentro del invernadero, y se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$N = \frac{Q}{VI}$$

donde  $N$  ( $s^{-1}$ ) se define en función de la razón entre el caudal de flujo de aire por unidad de tiempo ( $Q$ ,  $m^3 s^{-1}$ ), y el volumen de aire encerrado en el invernadero ( $VI$ ,  $m^3$ ) se calcula como función del tiempo en horas. El índice se estimó para diferentes escenarios, variando las velocidades del viento y los porcentajes de áreas de ventilación cenital y lateral desde 0 % hasta 100 % de apertura. Los resultados del índice de renovación se presentan en la tabla 1.4.

→ **Tabla 1.4** Índice horario de renovación de aire calculado para el invernadero prototipo en función de la velocidad del viento y del porcentaje de apertura de las ventilaciones cenitales y laterales.

VELOCIDAD DEL VIENTO ( $m s^{-1}$ )	APERTURA DE VENTILACIONES CENITALES Y LATERALES (%)				
	0	25	50	75	100
0,1	5,73	6,39	5,79	6,34	7,20
1,0	22,60	33,21	37,22	37,49	38,89
1,3	24,62	42,58	46,12	46,24	49,97
2,0	52,12	62,16	74,49	72,13	74,19
5,0	109,40	130,58	130,03	151,37	173,26

## 1.2.2 Comportamiento climático del prototipo a escala real

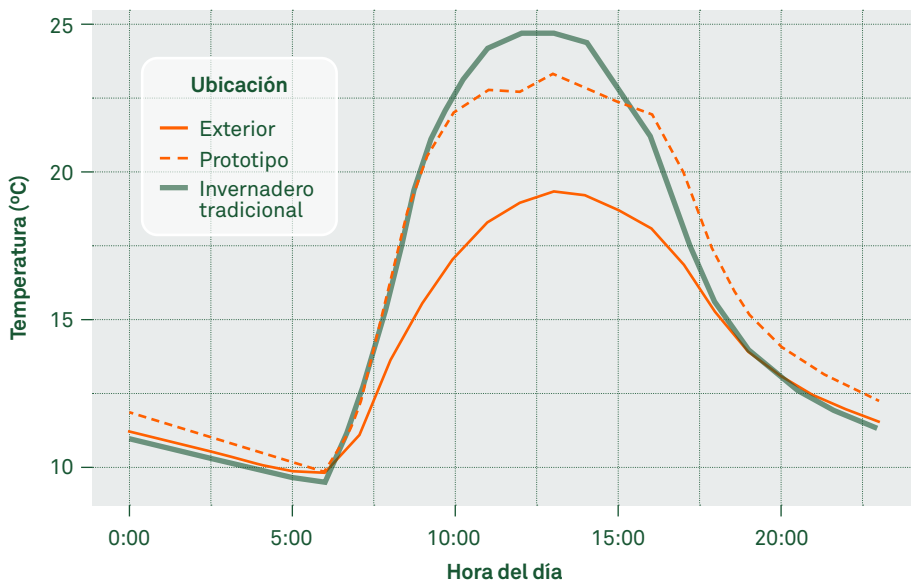
### 1.2.2.1 Temperatura

La temperatura promedio del aire dentro del invernadero se comparó hora a hora con respecto a la temperatura promedio del aire registrada en el exterior y contra lo observado en el invernadero de diseño tradicional. En la figura 1.3 se muestra el comportamiento de esta variable para las tres ubicaciones. La temperatura promedio durante las 24 h para el invernadero prototipo fue de 16,2 °C; en el exterior del invernadero prototipo registró un promedio de 14,1 °C, mientras que en el invernadero tradicional fue de 15,9 °C. En el invernadero prototipo se presentó una temperatura más alta durante las 24 h, como consecuencia del registro de unas temperaturas mayores durante la noche y buena parte del día, a excepción de la del mediodía.

El mayor rango de variación para la temperatura durante las 24 h del día se observó en el invernadero tradicional,

28

➔ **Figura 1.3** Comportamiento promedio horario de la temperatura dentro del invernadero prototipo y su comparación con respecto a la temperatura externa y a la registrada en un invernadero de diseño tradicional.



donde el rango entre el periodo más frío y el más cálido fue de 15,3 °C. En consecuencia, en el invernadero tradicional se alcanzan los mayores valores de temperatura, en particular durante el mediodía, pero, a su vez, también presenta las temperaturas más bajas durante la noche, en comparación con el invernadero prototipo. De otro lado, en el invernadero prototipo se presentó un menor rango de variación, registrándose un valor promedio de 13,5 °C. En particular, durante el mediodía, el invernadero prototipo no alcanzó temperaturas tan elevadas como las observadas para el invernadero tradicional, consecuencia de la mejora sustancial de la ventilación obtenida a través del incremento y disposición de las áreas de ventilación. El aumento en la altura del invernadero también promueve una mejor renovación de aire dentro del área de cultivo, evitando que las temperaturas se incrementen ocasionando condiciones de estrés para las plantas.

Los registros de temperatura correspondientes a las horas del día, es decir entre 6:00 y 18:00 h, indicaron una temperatura de 19,3 °C para el invernadero tradicional, mientras que para el invernadero prototipo el promedio fue de 19 °C. La mayor acumulación de calor en el invernadero tradicional es el resultado de la presencia de menores áreas de ventilación, lo cual restringe la rápida renovación de aire en su interior. En la medida en que se incrementan las áreas de ventilación, las temperaturas promedio registradas son menores, tal como se pone de manifiesto en los resultados obtenidos para el invernadero prototipo.

Durante las horas de la noche (18:00 a 6:00 h) en el ambiente exterior se registró una temperatura promedio de 12 °C, mientras que dentro del invernadero tradicional se observó una temperatura promedio de 11,9 °C. Estos resultados indican que no hay diferencia de temperatura entre el invernadero tradicional y el exterior, en particular durante las horas de la madrugada, cuando la diferencia se minimiza por completo. Por otra parte, en el invernadero prototipo el promedio de temperaturas nocturnas fue de 12,8 °C, el cual difiere en 0,9 °C con respecto a lo observado en el invernadero tradicional. A pesar de unas mayores áreas de ventilación, el invernadero prototipo cuenta con cortinas móviles que



**El invernadero presentó una mayor homogeneidad horizontal de la temperatura y durante los momentos de más alta radiación sus temperaturas fueron inferiores a las registradas en un invernadero de diseño tradicional.**







El criterio en el diseño del invernadero fue mejorar su comportamiento climático durante las horas del día por lo que durante la noche se comportó de manera similar al del invernadero tradicional.

permiten el cierre completo de las ventilaciones cenitales, impidiendo que el calor ganado durante el día se pierda de manera rápida, como ocurre con un invernadero de diseño tradicional.

Es importante tener presente que el área del invernadero prototipo no se cultivó en su totalidad, y que tan solo aproximadamente una cuarta parte del invernadero estuvo cultivada con clavel. La falta de área foliar y la elevada proporción de suelo descubierto contribuyen a que el clima observado en el invernadero no sea el que regularmente se esperaría si toda el área hubiera estado cultivada. Aun así, los resultados evidenciaron mejoras climáticas en comparación con el invernadero tradicional.

Asumiendo un rango de temperatura óptima en el día para el cultivo de clavel de 15 a 18 °C, los resultados obtenidos para esta caracterización indican que las temperaturas diurnas observadas en el invernadero propuesto se encuentran dentro del rango óptimo recomendado para el adecuado desarrollo del cultivo. De igual manera, las temperaturas observadas durante la noche fueron apropiadas según el rango recomendado, entre 10 y 12 °C. En la medida en que el clima interno del invernadero depende directamente del clima externo, la posibilidad de alcanzar la temperatura óptima para el cultivo está supeditado no solamente al manejo del clima interno del cultivo sino principalmente al clima externo en el cual se desarrolla el proceso productivo.

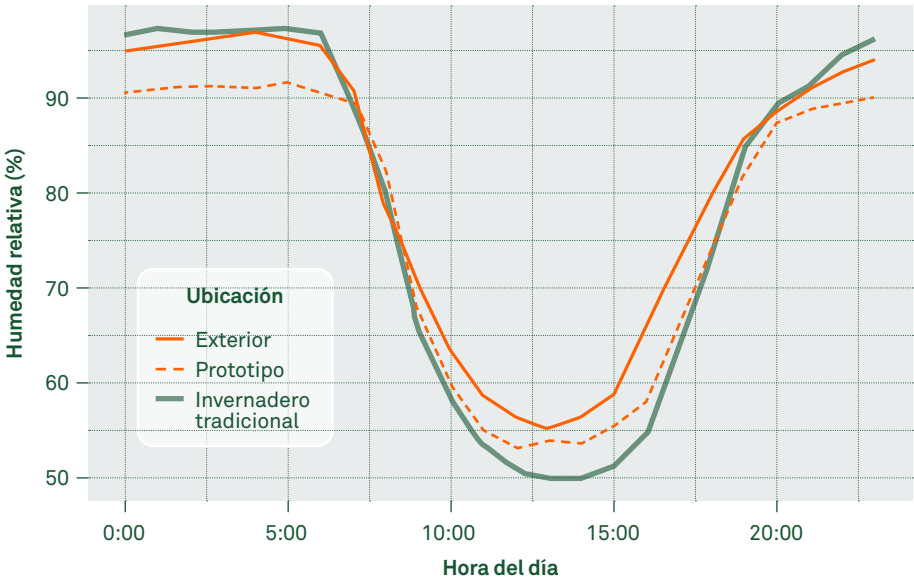
### 1.2.2.2 Humedad relativa

La comparación del comportamiento horario promedio de la humedad relativa para los dos invernaderos y el exterior se presenta en la figura 1.4. La curva de humedad relativa exhibe un comportamiento inverso al de la temperatura, donde, de manera general, los mayores valores de humedad relativa se registran durante la noche, mientras que en las horas del día se alcanzan los valores más bajos de la variable en mención. A medida que la temperatura del aire se incrementa, la capacidad del aire para retener vapor de agua también se aumenta, por lo que la humedad relativa va a ser inferior con respecto a valores de temperatura más bajos.

La humedad relativa promedio para las 24 h en el exterior fue de 80,5 %; para el invernadero tradicional fue de 78,2 % y para el invernadero prototipo, de 76,8 %. Si únicamente se toman en cuenta estos resultados promedio, no se muestran mayores diferencias en términos de humedad entre los tres ambientes considerados. Sin embargo, el comportamiento hora a hora descrito en la figura 1.4 sí evidencia diferencias en las curvas de humedad relativa.

Durante las horas de la noche (18:00 - 6:00 h), el invernadero prototipo registró de manera consistente valores de humedad relativa más bajos que los observados para el invernadero tradicional o el exterior. El promedio de humedad relativa en la noche para el invernadero prototipo fue de 87,8 %, mientras que para el invernadero tradicional y el exterior fue de 92 y 92,3 %, respectivamente. Lo anterior resulta de las mayores temperaturas nocturnas alcanzadas dentro del invernadero prototipo. En la medida en que la temperatura es más elevada, el aire en el invernadero prototipo tiene una mayor capacidad de retener vapor de agua, por lo que el

➔ **Figura 1.4** Comportamiento promedio horario de la humedad relativa dentro del invernadero prototipo y su comparación con respecto a la humedad relativa externa y a la registrada en un invernadero de diseño tradicional.





**El déficit de presión de vapor representa la diferencia entre la humedad presente en el aire y la cantidad de humedad que el aire puede retener cuando se encuentra completamente saturado de vapor de agua.**

valor de la humedad relativa disminuye. En el invernadero tradicional, la mayor humedad relativa aumenta la posibilidad de ocurrencia del fenómeno de condensación de agua libre sobre el follaje o sobre la película plástica.

El invernadero tradicional alcanza unos mayores valores de temperatura durante las horas del día (6:00 - 18:00 h), por lo que el aire está en capacidad de sostener una mayor cantidad de vapor de agua, disminuyendo los valores de humedad relativa. En el exterior se registró una humedad relativa promedio de 70,8 %, en el invernadero prototipo fue de 67,5 % y en el invernadero tradicional, de 66,3 %. Aun cuando en el invernadero prototipo se observa el fenómeno de acumulación de calor en su interior, las temperaturas no llegan a ser tan elevadas como las del invernadero tradicional, por lo que la humedad relativa se ubica en el medio de las curvas del exterior y del invernadero tradicional.

### 1.2.2.3 Déficit de presión de vapor

El déficit de presión de vapor (DPV) representa la diferencia entre la humedad presente en el aire y la cantidad de humedad que el aire puede retener cuando se encuentra saturado. Si el aire se encuentra saturado, ocurre el fenómeno de condensación de agua libre sobre las superficies, como las hojas o las láminas de polietileno. El comportamiento del DPV es inverso al de la humedad relativa. Mientras más grande sea el valor del DPV, mayor será el potencial del aire de retirar humedad de la planta y viceversa.

El comportamiento horario del DPV para los tres ambientes monitoreados se presenta en la figura 1.5. El DPV promedio para las 24 h en el invernadero tradicional fue de 0,333 kPa, en el exterior fue de 0,256 kPa y en el invernadero propuesto fue de 0,301 kPa. Las diferencias principales en términos del comportamiento del DPV se presentan durante las horas del día, en razón a que es a lo largo de este periodo cuando ocurren las mayores variaciones de temperatura.

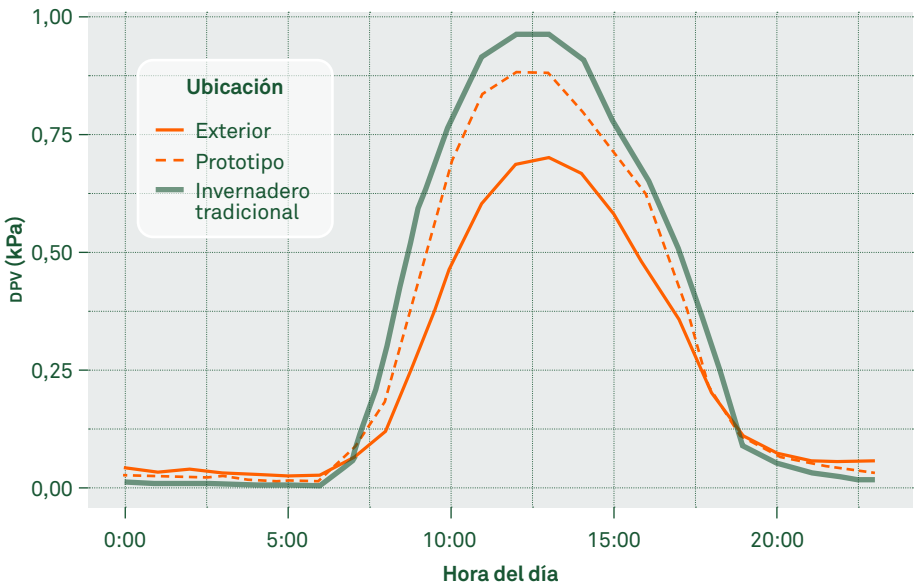
Durante las horas del día (6:00 - 18:00 h), el DPV en el exterior fue de 0,41 kPa, con un valor máximo registrado en el mediodía de 0,93 kPa. Los mayores valores de DPV se registraron dentro del invernadero tradicional con un promedio

de 0,57 kPa, con valores máximos cercanos a 1 kPa durante el mediodía. En medio de las curvas de DPV de estos dos ambientes se ubicó el comportamiento del DPV para el invernadero propuesto, con un promedio de 0,51 kPa.

A medida que baja la temperatura durante la noche, el aire solamente es capaz de retener una pequeña fracción del vapor de agua que le era posible retener durante el día. En consecuencia, las diferencias del contenido de vapor de agua en el aire con respecto al contenido de vapor de agua a saturación son menores, tal como se refleja en la figura 1.5. El DPV promedio en la noche para el ambiente exterior fue de 0,07 kPa, valor superior al del invernadero tradicional, donde el promedio fue de 0,05 kPa; el DPV nocturno para el invernadero prototipo fue de 0,06 kPa.

El comportamiento del DPV presentó la misma tendencia observada para la humedad relativa. Dadas las características del invernadero prototipo, la acumulación de vapor de agua ocurre durante la noche, pero en menor grado a lo observado en el invernadero tradicional en el que los valores

➔ **Figura 1.5** Comportamiento promedio horario del déficit de presión de vapor (DPV) dentro del invernadero prototipo, con respecto al DPV externo y al registrado en un invernadero de diseño tradicional.




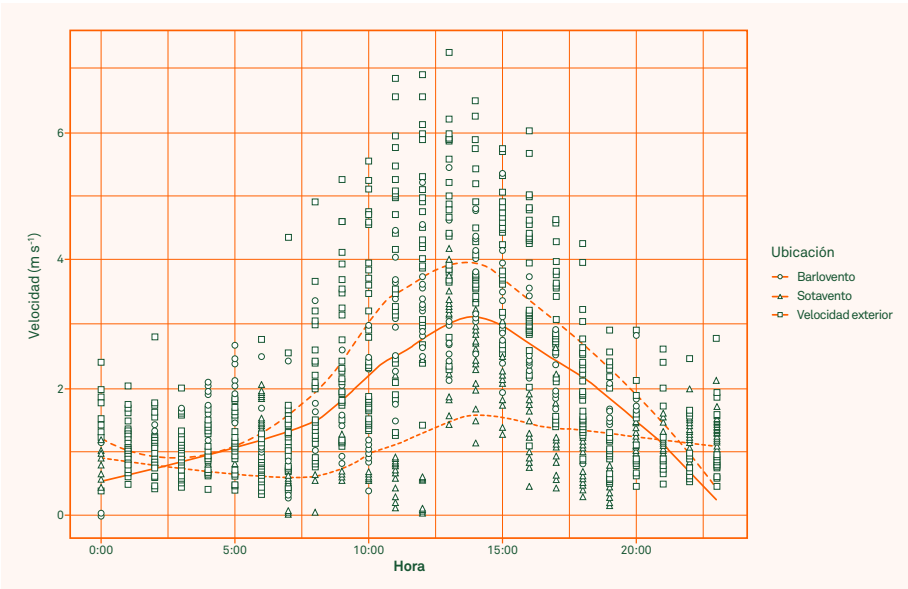
de DPV son más cercanos a cero. El alcanzar valores iguales a cero significa que el aire se encuentra completamente saturado de vapor de agua, y en consecuencia ocurriría el fenómeno de agua libre sobre el follaje o sobre la película plástica. En términos de humedad relativa, esta situación se refleja cuando se ha alcanzado una humedad relativa igual al 100 %.

### 1.2.3 Análisis de la ventilación cenital

En la figura 1.6 se presentan las velocidades horizontales de viento observadas en las ventilaciones cenitales tanto a barlovento como a sotavento y en el ambiente exterior al invernadero. En el exterior, la velocidad promedio del viento fue de  $2,1 \text{ m s}^{-1}$ ; en las ventilaciones orientadas en dirección barlovento fue de  $1,65 \text{ m s}^{-1}$ , mientras que las ventilaciones orientadas en la dirección contraria registraron  $1,04 \text{ m s}^{-1}$ .

Como era de esperar, las mayores velocidades de viento horizontal fueron las registradas en las ventilaciones en di-

 **Figura 1.6** Comportamiento promedio horario de las velocidades del viento horizontales registradas en el exterior, ventilación barlovento y ventilación sotavento del invernadero prototipo.



rección barlovento, es decir, aquellas ventilaciones que reciben el aire de forma directa y que entran justo al área interna del invernadero. La función principal de las ventilaciones en dirección sotavento es permitir la salida del aire caliente que se va generando dentro del invernadero, por lo que sus velocidades de viento son menores en comparación con las ventilaciones dispuestas en dirección contraria.

El promedio de la velocidad del viento durante el día en el exterior fue de  $3,0 \text{ m s}^{-1}$ , mientras que para las ventilaciones a barlovento y sotavento fueron de  $1,65$  y  $1,04 \text{ m s}^{-1}$ , respectivamente. El incremento de las velocidades del viento durante las horas del día en el exterior ocasiona el mismo efecto a la altura de las ventilaciones cenitales tanto en aquellas orientadas a barlovento como en aquellas orientadas a sotavento.

Durante las horas de la noche, en el exterior se registraron velocidades horizontales de viento con promedio de  $1,12 \text{ m s}^{-1}$ . Las velocidades de viento en la ventilación barlovento presentaron un promedio de  $0,013 \text{ m s}^{-1}$ , en tanto que para la ventilación sotavento el promedio fue de  $0,35 \text{ m s}^{-1}$ . La mayor velocidad de viento horizontal a la altura de las ventilaciones con orientación sotavento, observada en particular durante las primeras horas de la noche, es consecuencia de la salida del aire interno de mayor temperatura que se almacenó en el invernadero durante las horas del día, y que, progresivamente, va saliendo hacia el ambiente exterior.

El comportamiento del viento en su componente vertical para las dos orientaciones de ventilación se presenta en la figura 1.7. Como la estación climática solamente registra el componente horizontal de la velocidad del viento, esta variable no se incluyó en la comparación. Las velocidades verticales indican el movimiento hacia arriba o hacia abajo que presenta el viento en determinada ubicación. En este caso, la ventilación barlovento con sus velocidades del viento negativas indica que son las áreas a través de las cuales está ocurriendo la entrada de aire fresco al invernadero, principalmente durante las horas del día. De manera opuesta, la salida del aire interno del invernadero se produce a través de las ventilaciones con orientación sotavento, por lo que las velocidades registradas a lo largo de las 24 h son positivas.

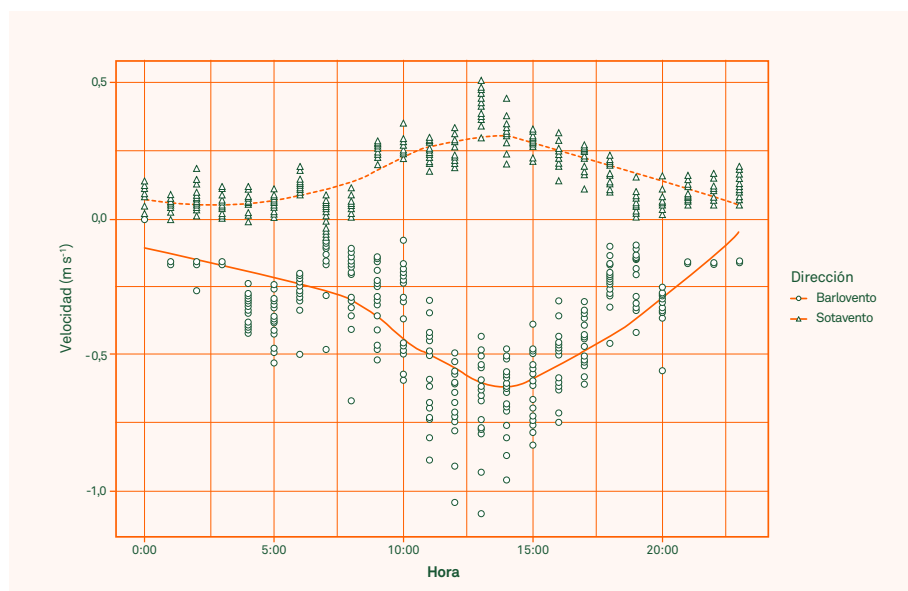


**El conocimiento de los perfiles horizontales y verticales de la velocidad del viento en las ventilaciones permite evaluar su comportamiento y eficiencia en términos de intercambio de aire.**





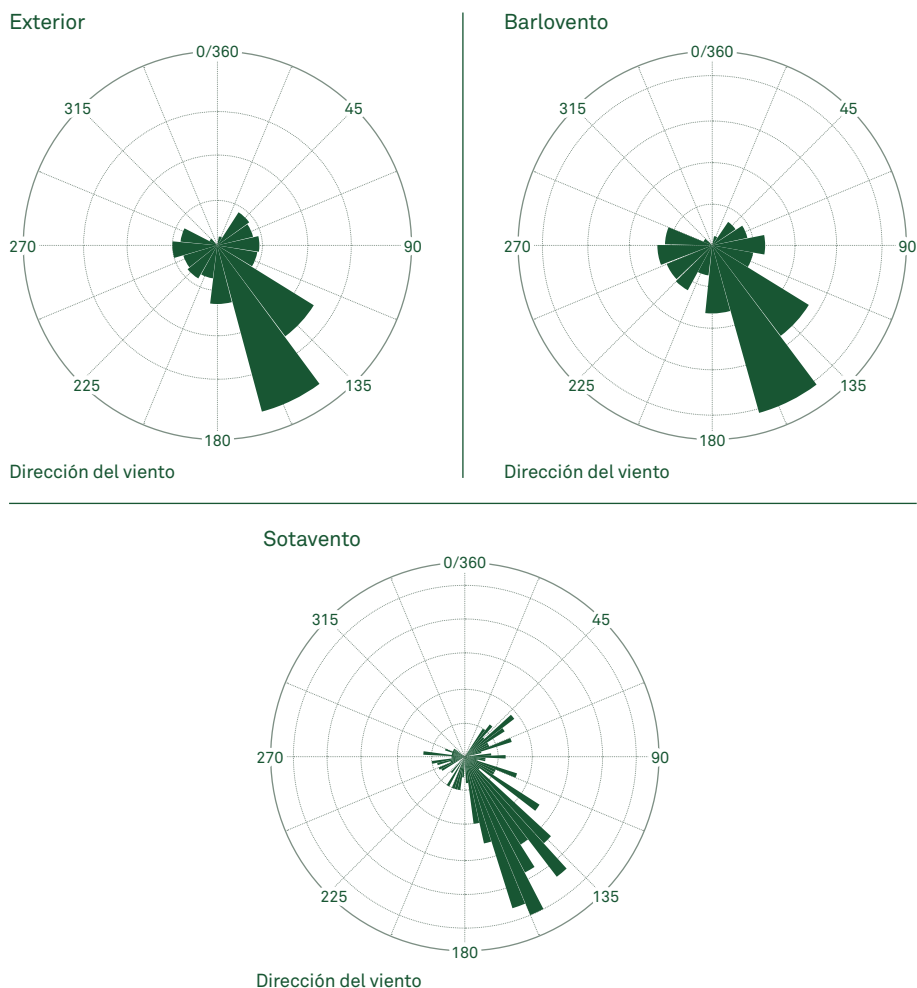
**Figura 1.7** Comportamiento promedio horario de las velocidades del viento verticales registradas en las ventilaciones a barlovento y sotavento del invernadero prototipo.



El promedio de velocidad del viento para las 24 h a barlovento y a sotavento fue de  $-0,33$  y  $0,15 \text{ m s}^{-1}$ , respectivamente. La mayor variación en la velocidad vertical se registró para la ventilación barlovento como consecuencia de la amplia variación de la velocidad del viento externo durante las 24 h. Durante las horas de la noche, las ventilaciones a barlovento y sotavento registraron promedios de  $-0,003$  y  $0,06 \text{ m s}^{-1}$ , lo cual indica una mayor salida de aire por las ventilaciones cenitales en relación con la porción de aire entrante. Al considerar las horas del día, la ventilación barlovento presentó un promedio de  $-0,45 \text{ m s}^{-1}$ , mientras que para la ventilación sotavento este promedio fue de  $0,22 \text{ m s}^{-1}$ . A medida que aumenta la velocidad externa durante el día, el aire es empujado a una mayor velocidad hacia el interior del invernadero.

En la figura 1.8 se presenta la rosa de los vientos para las tres ubicaciones consideradas: el ambiente exterior y las dos ventilaciones en orientación contraria. Las tres ventilaciones presentaron direcciones de viento muy similares con predominio de la orientación sureste.

➔ **Figura 1.8** Rosa de los vientos en el exterior, ventilación barlovento y ventilación sotavento registradas en el prototipo de invernadero construido.

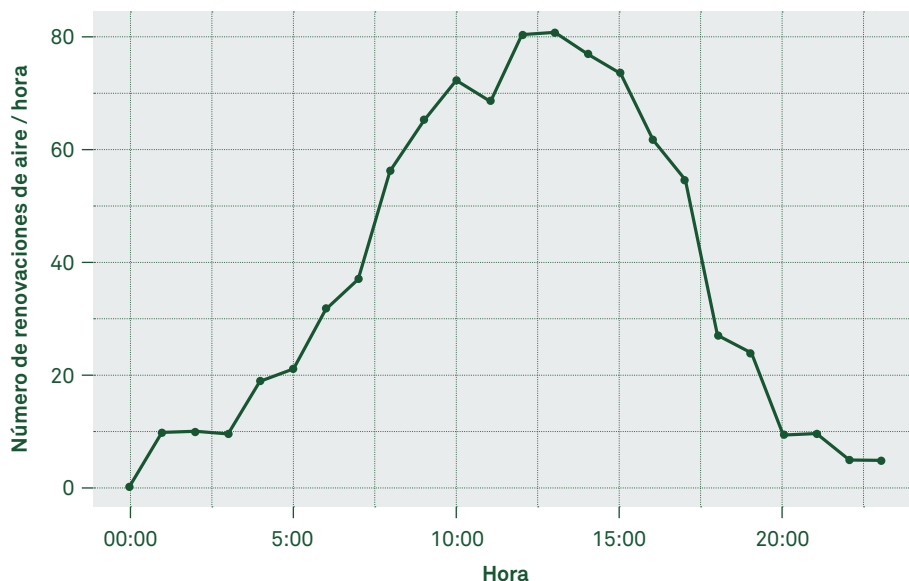


37

En las ventilaciones por donde ocurre mayoritariamente la salida de aire, es decir, por las ventilaciones sotavento, se presentó una mayor variación en las direcciones de salida del viento. Aun cuando continuó predominando la orientación sureste, se presentó un amplio rango de direcciones de viento, desde el noreste hasta el oeste.

En la figura 1.9 se observan los resultados para el número de renovaciones de aire por hora para la ventilación cenital

➔ **Figura 1.9** Número de renovaciones de aire por hora en función de la hora del día para el invernadero prototipo.



del invernadero prototipo, calculado a partir de la información de los flujos de aire en las ventilaciones cenitales y las áreas de ventilación en relación con el volumen total del invernadero. Esta figura muestra cómo, a medida que aumenta la velocidad exterior del viento, situación que alcanza su punto máximo alrededor del mediodía, es cuando se presenta la mayor renovación del aire interno del invernadero. En la medida en que la velocidad externa del aire disminuye, lo mismo se ve reflejado en el número de renovaciones como consecuencia del fenómeno pasivo de ventilación bajo el cual opera el invernadero.

Las grandes áreas de ventilación con que cuenta este invernadero permite que tenga unas tasas de renovación de aire bastante buenas. La literatura recomienda que un invernadero naturalmente ventilado disponga de un número de renovaciones de aire por hora superiores a 40. Este indicador se cumple con suficiencia en el invernadero prototipo, aun sin considerar el efecto adicional que sobre el número de renovaciones pueden generar las ventilaciones laterales. Estos resultados indicarían que sería posible manejar la ventilación

pasiva del invernadero solo a través de las ventilaciones cenitales sin afectar negativamente la renovación del aire interno. El comportamiento en campo del invernadero prototipo validó lo observado durante la fase de diseño y modelado de la geometría mediante CFD. Los resultados para el número de renovaciones aire registradas en campo son congruentes con los valores obtenidos de las simulaciones, presentados en la tabla 1.3.

## 1.3 Conclusiones

El invernadero propuesto en este capítulo introdujo cambios en la geometría del diseño del invernadero tradicional representados en el aumento del radio de curvatura de la cubierta, la disposición alternada de las ventilaciones cenitales y la presencia de deflectores verticales a la altura de las canales. Estas modificaciones incrementaron las áreas de ventilación del invernadero, reduciendo los saltos térmicos del invernadero y aumentando el número de veces que se renueva el aire interior, con respecto a un invernadero tradicional.

La estructura del invernadero prototipo permite establecer sistemas adicionales de control que posibiliten un manejo del clima más dinámico, que a su vez optimice aún más las condiciones bajo las cuales se desarrollan los cultivos en su interior. La mayor altura del invernadero prototipo se tradujo de manera práctica en una mejora de la inercia térmica del invernadero. Con base en lo anterior, se logró una rápida reposición del aire caliente, húmedo y con baja concentración de  $\text{CO}_2$  al nivel del área de cultivo por aire fresco cargado de  $\text{CO}_2$ , de manera que las plantas pueden adelantar de manera adecuada su proceso de fotosíntesis.

La optimización del diseño del invernadero tradicional desarrollada en este trabajo debe ir acompañada de mejoras en las características constructivas de los invernaderos locales. Aunque difícilmente se realizarán cambios en el material de cubierta, otros aspectos como su fijación a la estructura o el aumento de la hermeticidad del invernadero contribuirán a mejorar el desempeño de nuevas estructuras de

39



**El invernadero propuesto logró con suficiencia mejorar la renovación del aire interno, la inercia térmica de la estructura y la homogeneidad del microclima interno.**



invernaderos. El incremento de las áreas de ventilación cenital hace posible un mayor intercambio de aire durante el día y también durante las horas de la noche. Alternativas de cierre de las ventilaciones cenitales a través de cortinas como las instaladas en el invernadero prototipo reducen la pérdida del calor ganado durante el día y ayudan a mejorar las condiciones climáticas nocturnas a las cuales se ven expuestas los cultivos.

El trabajo de diseño de invernaderos desarrollado en este trabajo reafirma el potencial de la CFD como herramienta de modelado y simulación que reduce costos y recursos para llegar a obtener soluciones válidas, en este caso, referidas al diseño de invernaderos con un mejor comportamiento climático.

## Agradecimientos

Al proyecto “Fortalecimiento de la competitividad del sector floricultor colombiano mediante el uso de ciencia, tecnología e innovación aplicadas en Cundinamarca”, financiado por el Sistema General de Regalías y ejecutado en alianza entre la Universidad de La Salle, la Gobernación de Cundinamarca, la Asociación Colombiana de Exportadores de Flores (Asocolflores), el Centro de Innovación de la Floricultura Colombiana (Ceniflores), la Universidad Nacional de Colombia y la Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.

## Conflictos de interés y contribuciones de autoría

El manuscrito fue preparado y revisado de manera conjunta por los autores, quienes declaran no tener ningún conflicto de interés que comprometa la validez de los resultados aquí presentados.

## Referencias

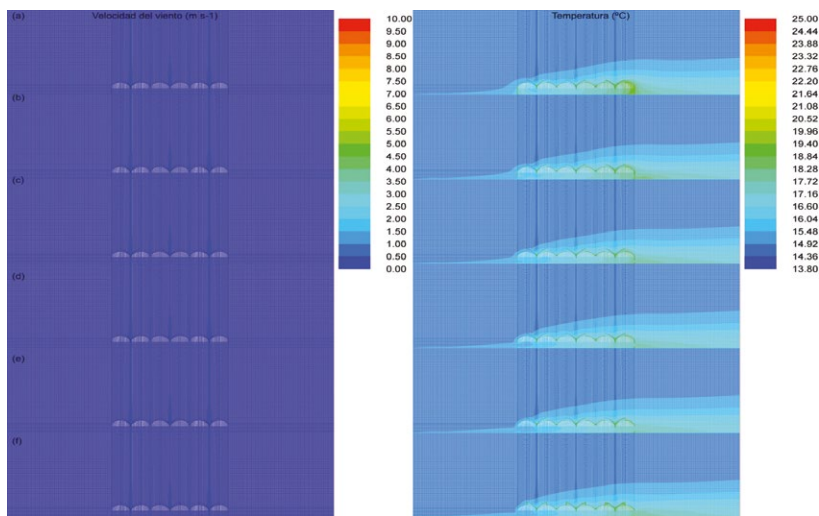
- Acuña, J.F., N. Bustamante, L.F. Casallas y N. Gutiérrez. 2004. Caracterización de los invernaderos para cultivo de flores en la Sabana de Bogotá. pp. 57-64. En: Memorias del VI Congreso Iberoamericano para el desarrollo y la aplicación de plásticos en agricultura. Cidapa. Bogotá.
- Bartzanas, T., T. Boulard y C. Kittas. 2004. Effect of vent arrangement on windward ventilation of a tunnel greenhouse. *Biosyst. Eng.* 88:479-490. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2003.10.006.
- Blazek, J. 2015. Introduction. pp. 1-5. En: Blazek, J. (ed.). *Computational fluid dynamics: Principles and applications*. 3.<sup>a</sup> ed. Elsevier: Oxford. 466p.
- Castilla, N. 2002. Current situation and future prospects of protected crops in the Mediterranean region. *Acta Hort.* 582:135-147. DOI: 10.17660/Acta Hort.2002.582.11.
- Cooman, A. 2002. Feasibility of protected tomato cropping in the high altitude tropics using statistical and system dynamic models for plant growth and development. Tesis de doctorado. Universidad Católica de Lovaina, Lovaina, Bélgica.
- Espinoza, K., A. López, D.L. Valera, F.D. Molina-Aiz, J.A. Torres y A. Peña. 2017. Effects of ventilator configuration on the flow pattern of a naturally-ventilated three-span Mediterranean greenhouse. *Biosyst. Eng.* 164:13-30. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2017.10.001.
- He, X., J. Wang, S. Guo, J. Zhang, B. Wei, J. Sun y S. Shu. 2017. Ventilation optimization of solar greenhouse with removable back walls based on CFD. *Comput. Electron. Agr.* 149:16-25. DOI: 10.1016/j.compag.2017.10.001.
- He, K.S., D.Y. Chen, L.J. Sun, Z.L. Liu y Z.Y. Huang. 2015. The effect of vent openings on the microclimate inside multi-span greenhouses during summer and winter seasons. *Eng. Appl. Comp. Fluid.* 9:399-410. DOI: 10.1080/19942060.2015.1061553.
- Kacira M., T.H. Short y R.R. Stowell. 1998. A CFD evaluation of naturally ventilated, multi-span, sawtooth greenhouses. *Trans. ASAE*. 41:833-837.





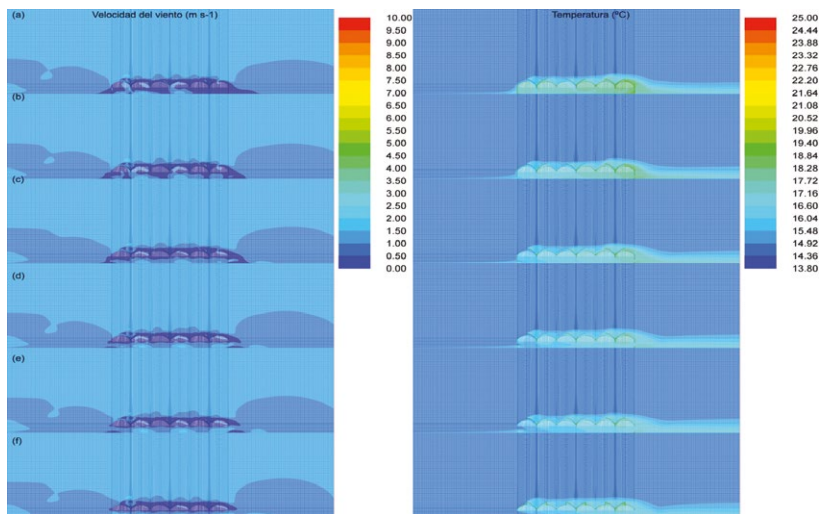
- Lee, S.Y., I.B. Lee y R.W. Kim. 2018. Evaluation of wind-driven natural ventilation of single-span greenhouses built on reclaimed coastal land. *Biosyst. Eng.* 171:120-142. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2018.04.015.
- McCartney, L. y M.G. Lefsrud. 2018. Field trials of the Natural Ventilation Augmented Cooling (nvac) greenhouse. *Biosyst. Eng.* 174:159-172. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2018.07.004.
- Molina-Aiz F.D., D.L. Valera, A.A. Peña, A.J. Álvarez y J.A. Gil. 2006. Analysis of the effect of rollup vent arrangement and wind speed on Almería-type greenhouse ventilation performance using computational fluid dynamics. *Acta Hort.* 719:173-179. DOI: 10.17660/ActaHort.2006.719.17.
- Molina-Aiz, F.D., T. Norton, A. López, A. Reyes-Rosas, M.A. Moreno, P. Marín, K. Espinoza y D.L. Valera. 2017. Using computational fluid dynamics to analyse the CO<sub>2</sub> transfer in naturally ventilated greenhouses. *Acta Hort.* 1182:283-292. DOI: 10.17660/ActaHort.2017.1182.34.
- Norton T., D. Sun, J. Grant, R. Fallon y V. Dodd. 2007. Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural industry: A review. *Bioresour. Technol.* 98:2386-2414. DOI: 10.1016/j.biortech.2006.11.025.
- Tuzel Y., H.F. de Zwart, A. Sapounas, S. Hemming y C. Stanghellini. 2017. Improvement of greenhouse design and climate control in Mediterranean conditions. *J. Food Agric. Environ.* 15:74-79. DOI: 10.17660/ActaHort.2017.1170.114.
- Villagrán, E.A. y C.R. Bojacá. 2017. Simulación con base en la técnica dinámica de fluidos computacional (CFD), para el diseño y optimización de la ventilación natural de los invernaderos de flores de corte en la Sabana de Bogotá. 1.<sup>a</sup> ed. Bogotá: Asocolflores - Ceniflores. 100p.
- Villagrán, E.A., R. Gil, J.F. Acuña y C.R. Bojacá. 2012. Optimization of ventilation and its effect on the microclimate of a Colombian multispan greenhouse. *Agro. Col.* 30(2):282-288.

Anexo 1.1 Resultado de las simulaciones realizadas mediante CFD

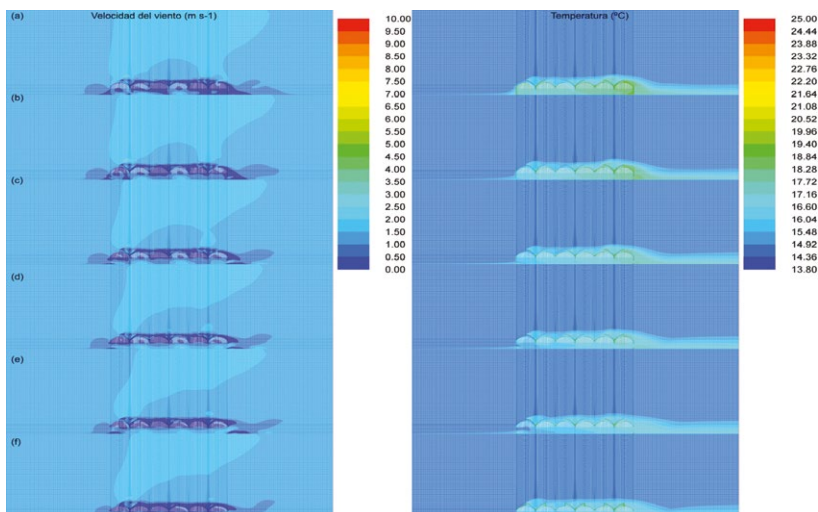


**Simulación S1.** Contornos de velocidad del viento ( $\text{m s}^{-1}$ ) y temperatura del aire dentro del invernadero propuesto para una velocidad externa del viento de  $0,1 \text{ m s}^{-1}$  y combinaciones de porcentajes de apertura de ventilación cenital (C) y lateral (L) así: a) C100 - L0; b) C100 - L25; c) C100 - L50; d) C100 - L75; e) C100 - L100; f) C0 - L100.

43

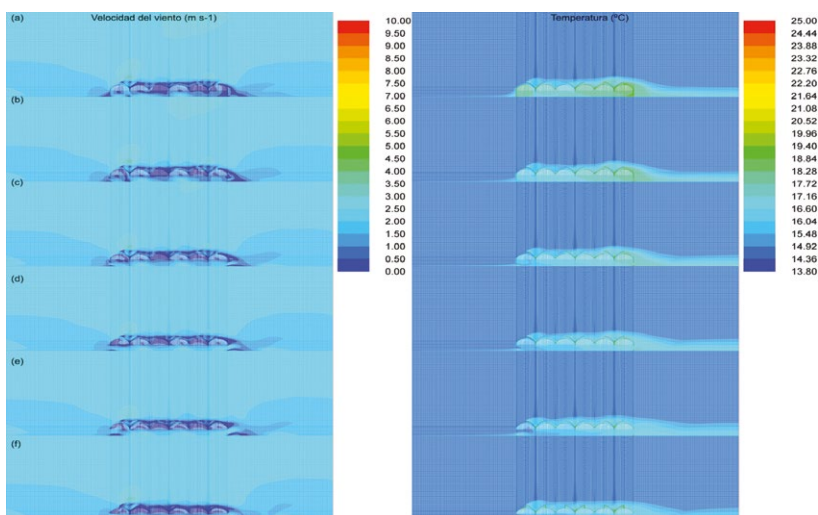


**Simulación S2.** Contornos de velocidad del viento ( $\text{m s}^{-1}$ ) y temperatura del aire dentro del invernadero propuesto para una velocidad externa del viento de  $1 \text{ m s}^{-1}$  y combinaciones de porcentajes de apertura de ventilación cenital (C) y lateral (L) así: a) C100 - L0; b) C100 - L25; c) C100 - L50; d) C100 - L75; e) C100 - L100; f) C0 - L100.

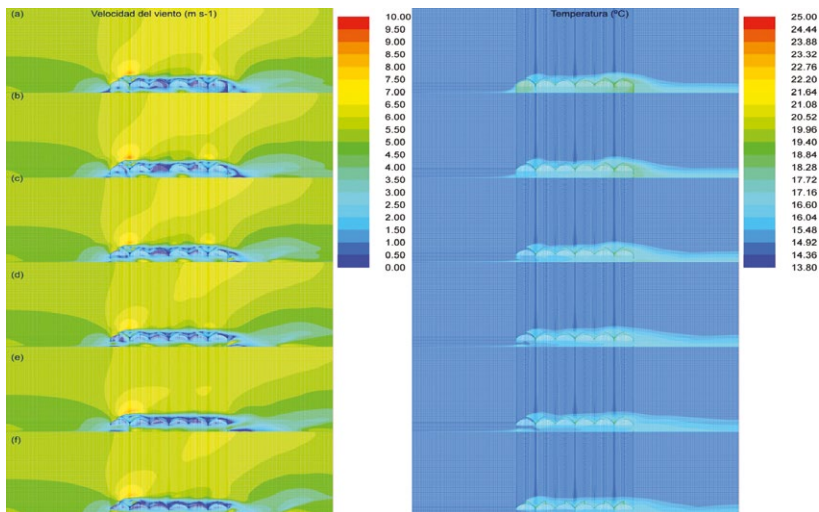


**Simulación S3.** Contornos de velocidad del viento ( $\text{m s}^{-1}$ ) y temperatura del aire dentro del invernadero propuesto para una velocidad externa del viento de  $1,3 \text{ m s}^{-1}$  y combinaciones de porcentajes de apertura de ventilación cenital (C) y lateral (L) así: a) C100 - L0; b) C100 - L25; c) C100 - L50; d) C100 - L75; e) C100 - L100; f) C0 - L100.

44



**Simulación S4.** Contornos de velocidad del viento ( $\text{m s}^{-1}$ ) y temperatura del aire dentro del invernadero propuesto para una velocidad externa del viento de  $2 \text{ m s}^{-1}$  y combinaciones de porcentajes de apertura de ventilación cenital (C) y lateral (L) así: a) C100 - L0; b) C100 - L25; c) C100 - L50; d) C100 - L75; e) C100 - L100; f) C0 - L100.



**Simulación S5.** Contornos de velocidad del viento ( $\text{m s}^{-1}$ ) y temperatura del aire dentro del invernadero propuesto para una velocidad externa del viento de  $5 \text{ m s}^{-1}$  y combinaciones de porcentajes de apertura de ventilación cenital (C) y lateral (L) así: a) C100 - L0; b) C100 - L25; c) C100 - L50; d) C100 - L75; e) C100 - L100; f) C0 - L100.





Productos Químicos Andinos S.A.S.

# Cubrimos sus necesidades



## Agrícola

Cubiertas de invernaderos  
Acolchado de suelos  
Camas hidropónicas  
Semitechos  
Secadores Solares  
Biodigestores  
Plásticos atérmicos  
Estabulación de ganado  
Ensilaje  
Reservorios  
Macrotúneles

## Industrial y comercial

Transparente baja densidad  
Bolsas  
Tubulares  
Negro Recuperado  
Stretch  
Stretch PVC  
Termoencogibles

## Geomembranas

HDPE (lisa y texturizada)  
LLDPE (lisa y texturizada)  
FPP (TPO)

[servicioalcliente@pqa.com.co](mailto:servicioalcliente@pqa.com.co)

[www.pqa.com.co](http://www.pqa.com.co)



CONTENIDO





# 2

## CAPÍTULO



# Evaluación funcional y aplicación de fertirriego en sustratos\*

Carlos Alberto González-Murillo<sup>1</sup>, Andrea López-Zuluaga<sup>2</sup>, María Fernanda Quintero Castellanos<sup>3</sup> y Víctor Julio Flórez Roncancio<sup>4</sup>

## RESUMEN

**Este capítulo busca coadyuvar a resolver** parcialmente preguntas que son de gran importancia en el sector floricultor, como lo constituye la búsqueda de un sustrato alternativo al sustrato tradicional (ST), así como señalar algunos aspectos operativos que permitan diseñar una estrategia de aplicación de fertirriego apropiada para el desarrollo de los cultivos en sustratos, y cuyos principios generales puedan ser extrapolados a la agricultura de cultivos sin suelo

(CSS) o en sustratos. La primera parte presenta los resultados de un proyecto de investigación que evalúa el efecto del crecimiento del cultivo de rosa en seis tipos de sustratos incluido el ST. Los sustratos evaluados se componían de mezclas de corteza de pino (CP), fibra de coco (FC), biochar (BC) con un porcentaje fijo de 20 % de compost (C) producido en las fincas productoras de flores de exportación. Se realizó el análisis granulométrico y se resalta la disminución que ocurre del porcentaje de finos en todos los tratamientos. Se obtuvieron las curvas de retención de humedad (CRH) de los sustratos, mostrando las diferencias esperadas,

49

\* Para citar este capítulo: González-Murillo, C.A., A. López-Zuluaga, M.F. Quintero C. y V.J. Flórez R. 2021. Evaluación funcional y aplicación de fertirriego en sustratos. En: Flórez R., V.J. (ed.). Productos relevantes del proyecto Fortalecimiento de la competitividad del sector floricultor colombiano mediante el uso de ciencia, tecnología e innovación aplicadas en Cundinamarca. Bogotá: Ediciones Unisalle, Ceniflores. pp. 48-95.

1. Ingeniero agrícola, Universidad Nacional de Colombia-Universidad del Valle. Magíster en Hidrología, Universidad Nacional de Irlanda. Profesor asociado, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Colombia, sede Bogotá. Correo electrónico: cagonzalezmu@unal.edu.co - ORCID: 0000-0002-2920-8425.

2. Ingeniera agrícola, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Especialista en SIG, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Correo electrónico: alopezzuluaga@gmail.com - ORCID: 0000-0003-0472-3567.

3. Ingeniera agrícola y magíster en Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Doctora en Agricultura protegida, Universidad de Almería, España. Profesora e investigadora de tiempo completo, Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México. Correo electrónico: maria.quintero@uaslp.mx - ORCID: 0000-0002-9130-0679.

4. Ingeniero agrónomo, Universidad Federal de Rio Grande del Sur (UFRRS). Doctor en Ciencias, Universidad Estatal de Campinas (UNICAMP). Profesor asociado, Departamento de Agronomía, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Correo electrónico: vjflorezr@unal.edu.co - ORCID: 0000-0002-3081-2400.



producto de su configuración granulométrica. Los resultados mostraron que los sustratos en donde se tienen 60CP (60 % de corteza de pino), combinada con 20C y 20BC o 20FC producen diferencias significativas de flores de exportación. Igualmente se señala que la relación agua fácilmente disponible/capacidad de aireación (AFD/CA) se constituye en un parámetro que podría ser utilizado para el apropiado manejo del riego. La segunda parte, producto del trabajo de investigación de campo generado por los problemas presentados en la producción de rosa de exportación, expone algunos elementos del manejo y aplicación del fertirriego y señala algunos elementos transversales necesarios para ser tenidos en cuenta por los técnicos que enfrentan la aplicación de riego.

**Palabras clave:** *caracterización hidrofísica, parámetros de riego, sustratos alternativos.*

## ABSTRACT

**This chapter is looking forward** to partially solve questions of great importance in the flower industry, such as to obtain an alternative substrate to the traditional one (ST). Seemingly, is pointing out it is necessary to enlight in operational issues which allow the engineers and technicians to design an accurate fertigation application strategy to develop the growing of crops in substrates and at the same time be useful to extrapolate to another type of crops grown in substrates. The first part introduces the research project results evaluating the effect of the growth of rose in six different types of substrates (treatments), including the traditional substrate (ST). The substrates evaluated were composed of mixtures of pine bark (CP), coconut fiber (FC), and biochar (BC) with a fixed percentage of 20 % of compost (C) produced at the farms. The granulometric analysis was performed and the results showed, and it is highlighted, a decreasing of the percentage of fines in all treatments. The CRH moisture retention curves of the substrates displayed the expected differences as a result of their particle size configuration. The results showed that the substrates with 60CP (60 % pine bark) combined with 20C and 20BC or 20FC

produce significant differences in export flowers. Likewise, it is pointed out that the AFD/CA ratio (Easily Available Water/ Aeration Capacity) constitutes a parameter that could be used for the proper management of irrigation. The second part, the product of the field research work, generated by the problems faced in the production of a rose for exportation, exposes some elements of the management and application of fertigation, which points out some common elements necessary to be taken into account by the technicians who faced the application of fertigation.

**Keywords:** *hydrophysical characterization, irrigation parameters, alternatives substrates.*



Se evalúa el efecto del crecimiento del cultivo de rosa en seis tipos de sustrato; y, se señalan elementos transversales necesarios para ser tenidos en cuenta por los técnicos que enfrentan la aplicación de fertirriego.



# Introducción

El uso extensivo de sustratos en Colombia se realizó por el sector floricultor debido a la incidencia del patógeno *Fusarium oxysporum* f.s. *dianthi*, agente causal de la marchitez vascular del clavel. El clavel fue sembrado en camas elaboradas con madera y contenedores plásticos, usando como sustrato proporciones diferentes entre la cascarilla de arroz cruda y la cascarilla de arroz quemada con grados diferentes de tostado, y en algunas ocasiones reusando la cascarilla; de igual manera, al sustrato se le fue incorporando compost producido por las mismas empresas floricultoras a partir de sus residuos vegetales. Este sustrato se denominará sustrato tradicional (ST). Este proceso de aprendizaje y producción mostró sus ventajas, especialmente relacionadas con la productividad y el rendimiento económico del clavel, y por ello algunas de las empresas exportadoras de flores vieron la posibilidad de implementar el sistema de producción en sustrato también para rosa.

Gayosso-Rodríguez *et al.* (2016) señalan como uno de los problemas actuales, los altos costos de los sustratos, así como los efectos perjudiciales a ciertos ecosistemas por la sobreexplotación de algunos materiales usados como sustratos. Esto es común para las minas de turba, las cuales generan problemas ambientales y una acelerada liberación de dióxido de carbono (Huang *et al.*, 2019). Estos problemas han incentivado la búsqueda de nuevos materiales que logren cumplir con los requerimientos de las plantas que se van a sembrar o que permitan una reproducción comercial de cultivos no tradicionales como las orquídeas (Buitrón *et al.*, 2016). En la Sabana de Bogotá, uno de los objetivos del proyecto Fortalecimiento de la competitividad del sector floricultor colombiano mediante el uso de ciencia, tecnología e innovación aplicadas en Cundinamarca fue explorar sustratos alternativos para la producción de rosa y clavel en invernadero.

Al respecto, se plantearon las siguientes preguntas relacionadas con la producción de flores de corte:

¿Qué sustrato podría convertirse en alternativa sustentable al sustrato tradicional en la producción de flores y cuál estrategia de fertirriego permitiría lograr altos rendimientos después de tres años de cultivo?



- a) ¿Qué sustrato económica y sustentablemente podría convertirse en alternativa al ST en la producción de flores de corte en la Sabana de Bogotá?
- b) Para este tipo de ST, así como otros que lo puedan reemplazar, ¿cuál sería una estrategia de fertirriego que permita lograr altos rendimientos después de los tres años de cultivo?

Estas preguntas las responden parcialmente los resultados de la investigación que se realizó con diferentes sustratos para el cultivo de rosa y la exposición de algunos elementos de manejo de sustratos y fertirriego que podrían permitir mejorar sustancialmente la aplicación de fertirriego en los cultivos de rosa y clavel sembrados en sustrato.

## Cinco mezclas de sustratos evaluadas para rosa

La falta de suelos idóneos, la infestación de los suelos con patógenos luego de su uso continuado y el deseo de brindar las condiciones óptimas para el desarrollo del cultivo han incidido en el cambio de los sistemas de producción de cultivos en suelo hacia sistemas de cultivo sin suelo (scs) (Barbaro *et al.*, 2014). Los sustratos han sido ampliamente usados en el cultivo de plantas ornamentales, y son reconocidos por ser capaces de soportar eficientemente producciones intensivas (Barrett *et al.*, 2016; Samartzidis *et al.*, 2005). De manera general, en comparación con el suelo, los sustratos poseen una mayor porosidad, son más livianos, tienen pocas limitaciones químicas, permiten manejar fácilmente la fertilización de acuerdo con las necesidades nutricionales del cultivo y suelen estar libres de plagas y patógenos que pueden afectar el cultivo (Wang *et al.*, 2016). A nivel mundial, los materiales más usados en los scs son la turba, la perlita, la fibra de coco, la corteza de pino, entre otros (Hernández-Apaolaza *et al.*, 2005). En Colombia, la mayor parte de la producción de flores de corte usa como medio de cultivo la cascarilla de arroz cruda, combinada en diferentes proporciones con



cascarilla de arroz quemada, tostada en diferentes intensidades y con compost de residuos vegetales. Sin embargo, la disponibilidad de la cascarilla de arroz ha disminuido en los últimos años y su costo ha aumentado debido a la demanda creciente de este material en la industria cementera, así como a la reducción de las áreas sembradas en arroz en Colombia (Hossain *et al.*, 2018; Portillo-Rodríguez, 2013; Zou y Yang, 2019). La agroindustria de la producción de flores de corte en Colombia ha reconocido la problemática, y en la actualidad emplea materiales compuestos que incluyen la cascarilla de arroz. Por ello, es pertinente evaluar la viabilidad técnica del uso de subproductos de las industrias nacionales a fin de tener sustratos alternativos que puedan ser utilizados en la producción ornamental intensiva.

La estabilidad de las propiedades físicas de los sustratos son de especial relevancia, dado que el cambio de estas propiedades afecta la disponibilidad de agua, aire y nutrientes en la zona radical, lo cual repercute en el desarrollo de las plantas (Allaire-Leung *et al.*, 1999; Michel y Kerloch, 2017). Igualmente, afecta las estrategias de manejo de la aplicación del fertirriego para mantener condiciones homogéneas en una finca productora de flores de corte. En los sustratos no solo es importante conocer la capacidad de retención de humedad; también es indispensable conocer la capacidad de aireación de estos (Noguera, 2000). Este mismo autor expresa con criterios sencillos que las raíces requieren oxígeno para mantener su actividad metabólica y su desarrollo; un déficit temporal de oxígeno puede reducir el crecimiento de las raíces y de la parte aérea, y las condiciones de hipoxia/anoxia que prevalezcan durante periodos prolongados pueden provocar efectos en la producción del cultivo. Por otra parte, el oxígeno disponible tiene un efecto sobre la fisiología de los microorganismos, así como en el consumo de agua y nutrientes. De la misma forma, afecta las estrategias de manejo de la aplicación del fertirriego para mantener condiciones que busquen una alta productividad y permitan una mayor homogeneidad en los procesos de producción.



## 2.1 Materiales y métodos de la evaluación de sustratos en rosa

El ensayo se desarrolló en el Centro Agropecuario Marango (CAM) de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, en el marco del proyecto Fortalecimiento de la competitividad del sector floricultor colombiano mediante el uso de ciencia, tecnología e innovación aplicadas en Cundinamarca.

Se utilizaron dos naves (cada una de  $6,8 \times 50$  m) de un invernadero tradicional tipo flexon, con estructura metálica, y ventilación lateral y cenital pasiva. En camas de 15 m de longitud suspendidas con estructura en madera y a doble contenedor plástico, plantas de rosa cv. Freedom injertado sobre el patrón Natal Briar fueron sembradas en seis diferentes sustratos, uno comercial y cinco mezclas alternativas, para una densidad de siembra de 65 000 plantas por hectárea. A las plantas se les dio una formación de 12 semanas y, en seguida, se realizó la poda de formación de manera uniforme sobre todo el cultivo.

La fertirrigación se realizó siguiendo los estándares comerciales. Se aplicó una fórmula de fertilización comercial desde la siembra hasta el final del primer pico de cultivo, la cual estuvo compuesta por N: 180 (N-NO<sub>3</sub>, 153 y N-NH<sub>4</sub>, 27); P: 30; K: 180; Ca: 120; Mg: 60; Fe: 1; Mn: 1; Cu: 0,1; Zn: 0,5; B: 0,3; y Mo: 0,1 mg L<sup>-1</sup>. Se aplicó una lámina de 95 L cama/día para todos los sustratos. El manejo del fertirriego fue uniforme en razón al diseño experimental establecido en campo, donde la variable por evaluar era la respuesta del sustrato.

En un diseño completamente al azar (DCA) se evaluaron seis tratamientos (sustratos): uno comercial y cinco mezclas alternativas de sustratos, con tres repeticiones cada uno. El factor asociado a la variación lo constituyen las diferentes mezclas de sustratos sobre las cuales se encuentran sembradas las plantas. La unidad experimental (UE) corresponde a segmentos de cama de 2 m de longitud, con un total de 18 plantas por UE.



Es pertinente evaluar la viabilidad técnica del uso de subproductos de la industria nacional a fin de tener sustratos alternativos a la cascarilla de arroz que puedan ser utilizados en la producción ornamental intensiva.



En la tabla 2.1 se muestran los tratamientos de los cinco sustratos alternativos evaluados en campo, cuya composición consiste en mezclas con proporciones decrecientes en fibra de coco<sup>5</sup>, crecientes en corteza de pino (*Pinus patula*), dos mezclas con 20 % de biochar de raquis de palma, y en las cinco mezclas se incluyó un 20 % de compost de residuos vegetales de rosa y clavel. También se detalla la composición del tratamiento testigo, usado en condiciones comerciales, compuesto de cascarilla de arroz, sustrato reutilizado y compost.

➔ **Tabla 2.1** Composición de los sustratos alternativos y del sustrato tradicional evaluados en el cultivo de rosa.

TRATAMIENTO	PORCENTAJE DE CADA MATERIAL EN LAS MEZCLAS (V/V/V)			
	FIBRA DE COCO (Fc)	CORTEZA DE PINO (CP)	BIOCHAR (bc)	COMPOST (c)
T1. 60FC:20BC	60		20	20
T2. 40FC:40CP	40	40		20
T3. 20FC:60CP	20	60		20
T4. 80CP		80		20
T5. 60CP:20BC		60	20	20
T6. Sustrato tradicional (ST), que equivale al testigo comercial: 50 % de cascarilla cruda, 25 % de sustrato reutilizado, 15 % de cascarilla tostada y 10 % de compost.				

Las variables físicas medidas en el Laboratorio de Física de Suelos del Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola de la Universidad Nacional de Colombia fueron granulometría y curva de retención de humedad (CRH), a tensiones de humedad del suelo de 0, 5, 10, 20, 30, 50 y 100 centímetros de columna de agua (cca).

Se realizaron dos muestreos durante el primer ciclo del cultivo: un muestreo inicial que se consideró semana cero después de siembra (SDS) y uno en el estadio “pico de producción”, en la 22 SDS. En cada uno de esos estadios se tomaron muestras de sustratos por repetición para la caracterización física y química, para un total de 18 muestras por estadio.

En los estadios de desarrollo de las plantas o de los tallos florales denominados “poda de formación”, “primordio

5. La fibra de coco fue proporcionada por la empresa Ecol-fibras, la corteza de pino por Smurfit Kappa y el biochar de raquis de palma por Oleaginosas San Marcos.

floral” y “pico de producción” se tomó una planta completa por unidad experimental (UE) para determinar la biomasa en la raíz y la parte aérea.

Se registró la productividad y la calidad de la producción hasta la 23 SDS. Para la clasificación de los tallos florales se tuvieron en cuenta, entre otros parámetros, la longitud y diámetro del tallo, observando los siguientes grados de calidad: °90 (corresponde a longitud del tallo floral > 90 cm), °80 (80-89 cm), °70 (70-79 cm), °60 (60-69 cm), °50 (50-59 cm), °40 (40-49 cm) y nacional. Los criterios para clasificar tallos florales en el grado de calidad nacional fueron: tallos cortos (< de 40 cm), tallos delgados o torcidos, cabezas florales con “cuello de ganso”, e incidencia de plagas o enfermedades.

El análisis estadístico se realizó con el *software* R. Para el tratamiento de los datos se llevó a cabo un análisis de varianza y la prueba de Tukey, donde se contrastaron los resultados obtenidos en los sustratos alternativos con el resultado obtenido en el sustrato tradicional.

## 2.2 Resultados de la evaluación de sustratos en rosa

### 2.2.1 Caracterización física

Es necesario hacer el estudio de las propiedades hidrofísicas del sustrato a lo largo del cultivo debido a los cambios constantes de sus características en función de los ciclos de humedecimiento (riego) – secamiento (drenaje y evapotranspiración) y del desarrollo radicular de las plantas. Unas buenas propiedades físicas del sustrato coadyuvan a mejorar el desarrollo y la productividad del cultivo (Cannavo y Michel, 2013; Chamindu *et al.*, 2013).

#### 2.2.1.1 Distribución de tamaño de partícula

La evolución de la distribución del tamaño de partículas para cada una de las mezclas de sustratos evaluadas se muestra en la figura 2.1. Se encontró que para la 0 SDS, los sustratos evaluados tienen un índice de grosor (Richards *et al.*, 1986);



Los sustratos evaluados consistieron en mezclas con proporciones decrecientes de fibra de coco, crecientes de corteza de pino, en mezclas con biochar de raquis de palma, y compost de residuos vegetales de rosa y clavel.





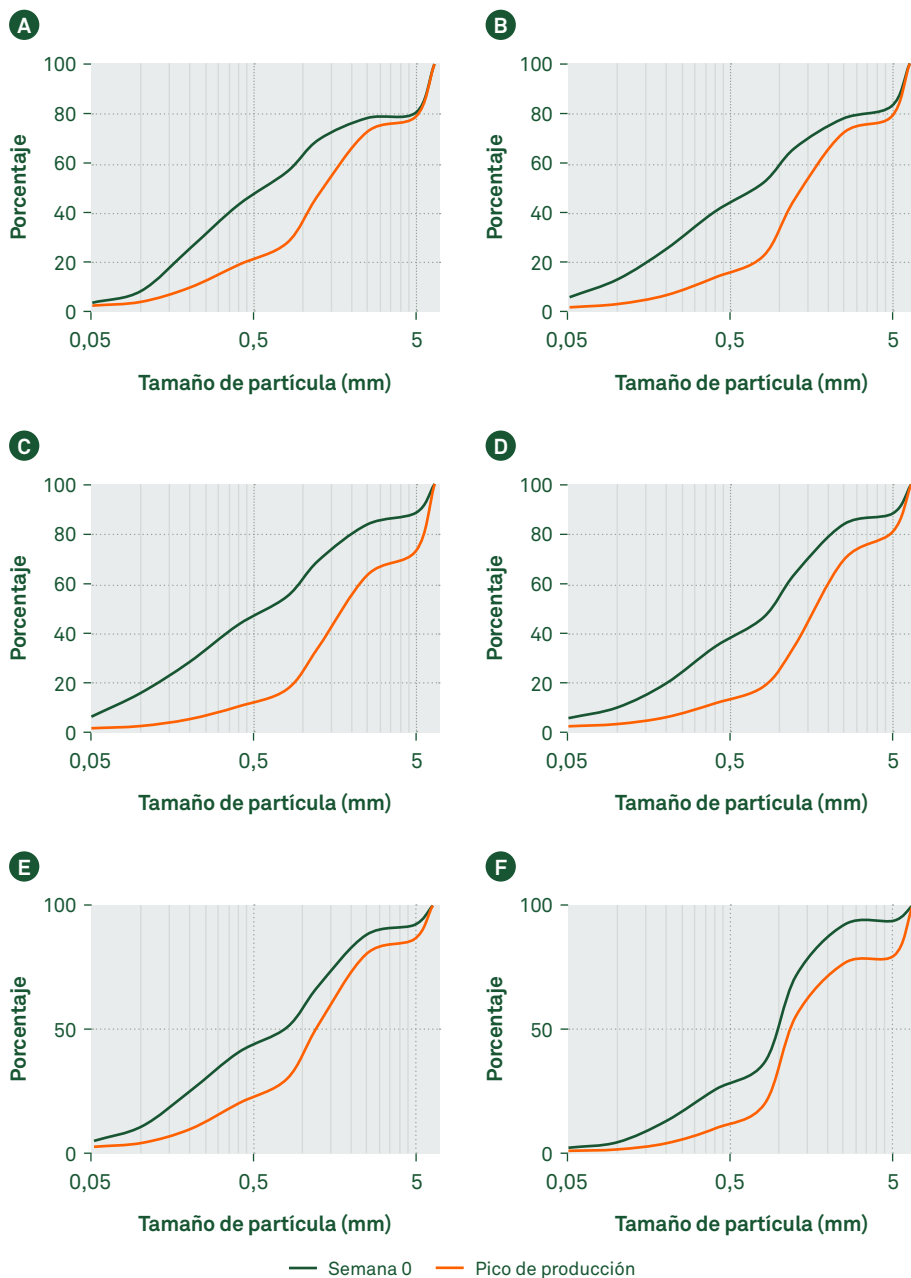
**La práctica común de realizar refuerzos de riego con poma o con cacho con el fin de uniformizar la humectación de los sustratos intensifica el lavado de las partículas finas hacia las partes más profundas del contenedor.**

porcentaje de partículas con tamaño superior a 1 mm, que oscilan entre 44 % y 54 % en los sustratos alternativos (T1 a T5) y 63 % en el sustrato tradicional (ST) usado. Igualmente, se observó una mayor proporción de partículas finas: menores a 1 mm (Ansorena, 1994) en los sustratos alternativos, y una menor proporción de partículas finas en el sustrato comercial (T6). Sin embargo, para todos los sustratos evaluados la proporción de finos disminuyó en la 22 SDS (figura 2.1). Esta disminución de proporción no fue constante a lo largo del primer pico de producción; como se muestra en la figura 2.1, todas las mezclas evaluadas perdieron un porcentaje diferente de las partículas finas que las componen, lo que se corrobora con la cantidad de finos que se recogen en las aguas de drenaje. Otra explicación de este proceso se debe a la práctica común de realizar refuerzos de riego con manguera directamente al sustrato, denominado riego con poma o con cacho, procedimiento que se lleva a cabo para mejorar la uniformidad de la humectación de los sustratos. Durante esta práctica se intensifica el lavado de las partículas más finas presentes en el sustrato hacia las partes más profundas del contenedor. En consecuencia, el índice de grosor de todas las mezclas aumentó entre un 20 % y 39 %. Los porcentajes de finos disminuyeron en todas las muestras, afectando de hecho el agua aprovechable o fácilmente disponible (AFD) para el cultivo. De acuerdo con Ingram *et al.* (1993), los sustratos con una gran proporción de partículas finas tienen una mayor capacidad de retención de humedad y una menor capacidad de aireación con respecto a materiales con un mayor índice de grosor. No obstante, aunque la capacidad de aireación sea elevada, producto de la integración de partículas gruesas al medio de cultivo, estas podrían reducir la conectividad entre poros (Caron y Nkongolo, 1999).

### **2.2.1.2 Curva de retención de humedad**

Las relaciones granulométricas mostradas en las figuras 2.1A a 2.1F coadyuvaban a explicar los resultados de la optimización de parámetros de la curva de retención de humedad (CRH) de los sustratos evaluados. Los resultados de la tabla 2.2 señalan que las CRH varían considerablemente entre los

➔ **Figura 2.1** Variación en la distribución del tamaño de partícula de los sustratos evaluados desde la semana cero hasta la semana 22 (pico de producción) después de siembra. Mezclas en volumen de cada componente representado en porcentajes: **A.** 60FC:20BC:20C; **B.** 40FC:40CP:20C; **C.** 20FC:60CP:20C; **D.** 80CP:20C; **E.** 60CP:20BC:20C; **F.** Sustrato tradicional (ST) a base de cascarilla de arroz.



FC = Fibra de coco; CP = Corteza de pino; BC = Biochar; c = Compost.

➔ **Tabla 2.2** Relaciones de presión en cca versus el contenido de humedad con base en volumen ( $\Theta$ ) a las presiones que expresan la CRH (0-100 cca) y los parámetros de riego (CA - AFD - ADD) obtenidos de las CRH para los seis tratamientos del ensayo en la semana cero.

TRATAMIENTO	$\Theta$ A DIFERENTES TENSIONES DE HUMEDAD DEL SUSTRATO (EN CCA)							PARÁMETROS DE RIEGO (%)		
	0	5	10	20	30	50	100	CA	AFD	ADD
T1. 60FC:20BC	0,76	0,60	0,50	0,41	0,37	0,33	0,29	26	17	4
T2. 40FC:40CP	0,73	0,64	0,49	0,39	0,36	0,35	0,34	24	14	1
T3. 20FC:60CP	0,69	0,46	0,40	0,35	0,32	0,29	0,25	28	11	4
T4. 80CP	0,68	0,42	0,39	0,35	0,33	0,31	0,28	30	8	3
T5. 60CP:20BC	0,69	0,45	0,39	0,33	0,30	0,27	0,23	30	12	4
T6. Sustrato tradicional	0,62	0,26	0,22	0,18	0,17	0,15	0,12	40	7	2

FC = Fibra de coco; CP = Corteza de pino; BC = Biochar.

sustratos evaluados. Como cada mezcla tiene materiales con diferentes proporciones de finos y gruesos, así como su distribución de tamaño de partículas, es razonable esperar que el valor de sus propiedades sea diferente.

El ST evaluado tiene un valor de capacidad de aireación (CA) alto (40 %) y una baja capacidad de retención de humedad, lo cual difiere de lo esperado, aunque podría explicarse por la proporción de la cascarilla de arroz cruda (CAC), que se caracteriza por ser hidrófoba y tener un tamaño de partícula grande (> 2 mm). Ser repelente al agua es una característica que Qi *et al.* (2011) señalan como generadora de histéresis. El agua fácilmente disponible (AFD) del ST es igual al 8 %. Por el contrario, los sustratos con una gran composición de partículas finas como en 60FC:20BC y 40FC:40CP presentan un AFD entre 14 % y 17 %, respectivamente. La composición de las partículas finas se debe a la mezcla con el biochar y con el compost, los cuales tienen un porcentaje alto de finos. A diferencia de lo reportado por Rivas *et al.* (2010), quienes referencian que los sustratos de corteza de pino tienen entre 20 y 35 % de AFD, se encontró que los sustratos con una gran fracción a base de corteza de pino tienen un AFD de 11 %, excepto la mezcla 80CP, que posee una capacidad de retención similar a lo reportado por Caron *et al.* (2010) y al sustrato comercial. Se podría explicar porque la mezcla con el compost genera una apropiada proporción de macroporos

y microporos que produce una gran cantidad de poros de tamaño intermedio, y estos tienen el potencial de mejorar la capacidad de retención de humedad del sustrato (Sahin *et al.*, 2002). Asimismo, los sustratos con base en corteza de pino presentaron una CA superior al 28 %, adecuada para el normal desarrollo del cultivo.

En la tabla 2.3 se presentan los parámetros de la CRH ajustados al modelo de Van Genuchten (1980).

 **Tabla 2.3** Parámetros de la CRH ajustados al modelo de Van Genuchten (1980) con  $m = 1 - 1/n$

TRATAMIENTO	$\Theta_R$	$\Theta_s$	$\alpha$	N	$1/\alpha$	SSE
T1. 60FC:20BC	0,0	0,55	0,232	1,346	4,3	0,0010
T2. 40FC:40CP	0,0	0,41	0,269	1,334	3,7	0,0019
T3. 20FC:60CP	0,0	0,61	0,874	1,219	1,1	0,0003
T4. 80CP	0,0	0,54	0,519	1,259	1,9	0,0002
T5. 60CP:20BC	0,0	0,70	1,153	1,230	0,9	0,0004
T6. Sustrato tradicional	0,0	0,63	6,110	1,247	0,2	0,0001

FC = Fibra de coco; CP = Corteza de pino; BC = Biochar.

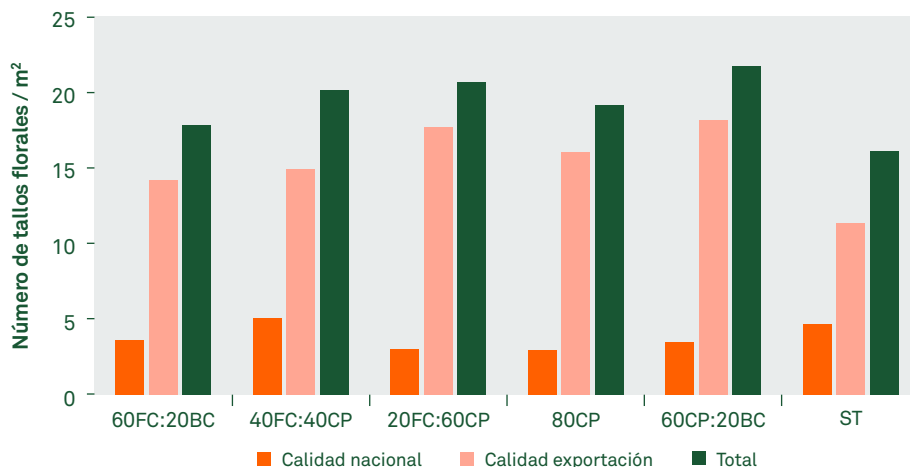
### 2.2.2 Productividad y calidad

Para determinar si existen diferencias significativas entre la producción de tallos florales de grados de calidad de exportación, nacional y el total de tallos producidos, inicialmente se realizó un análisis de varianza incluyendo todos los sustratos evaluados, con la hipótesis de  $H_0: \mu_1=\mu_2=\mu_3=\mu_4=\mu_5=\mu_6$ . El análisis de varianza no rechazó la hipótesis nula en ninguna de las tres producciones. Sin embargo, dada la magnitud de la diferencia que existe (figura 2.2) en los promedios entre los sustratos que contienen corteza de pino 80CP, 20FC:60CP y 60CP:20BC con el ST (comercial) se procedió a realizar la Anova entre los resultados de los sustratos que contenían CP y la producción en el ST, caso en el cual la hipótesis nula fue rechazada, es decir, al menos uno de los promedios es diferente.

Consecuentemente, se realizó una prueba de Tukey que permitiera la multicomparación entre los resultados de la producción de flor entre dichos sustratos (figuras 2.3A-2.3C).



**Figura 2.2** Promedios por tratamiento de la producción de tallos florales de rosa, considerando el total de tallos florales y los clasificados en nacional y flor de exportación.

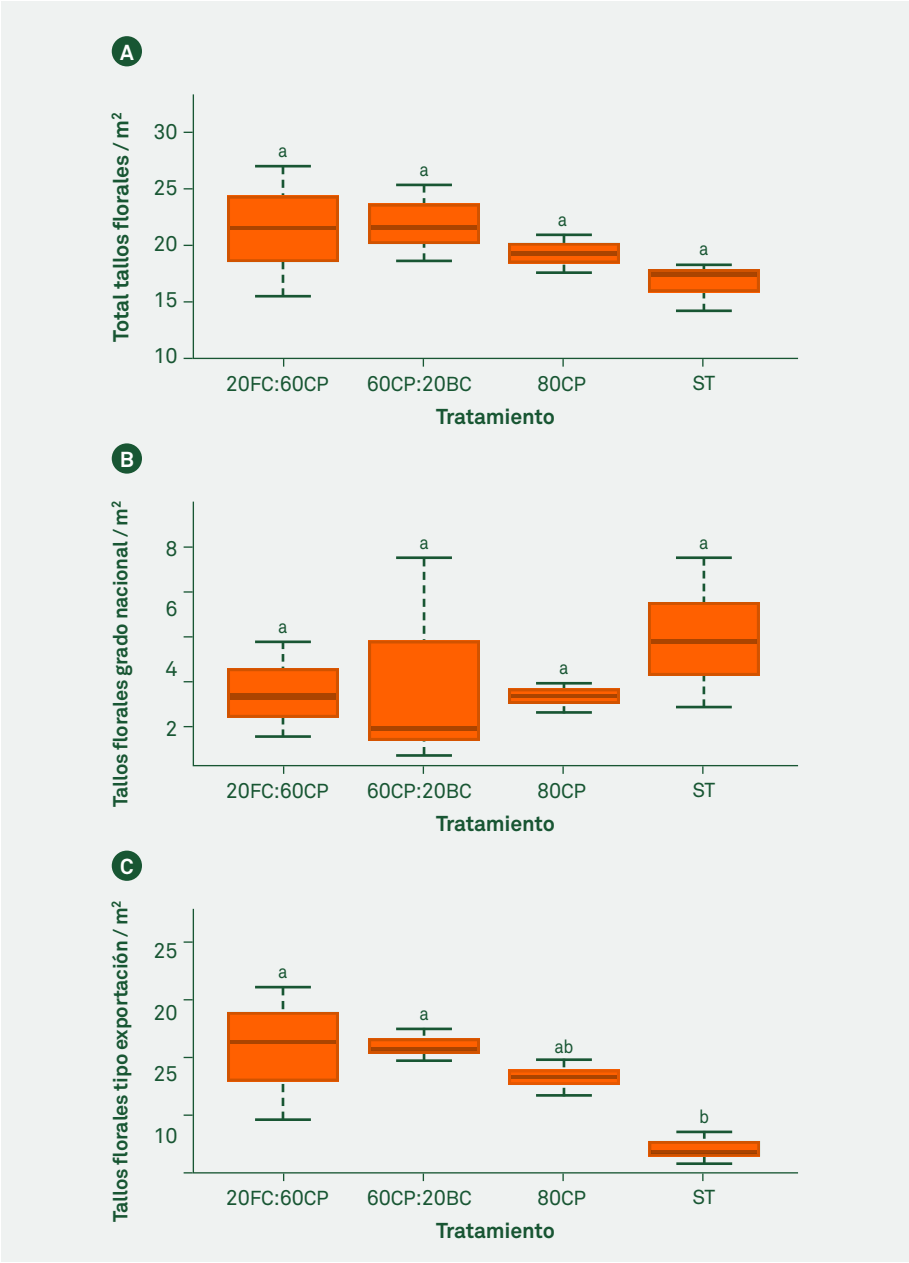


FC = Fibra de coco; CP = Corteza de pino; BC = Biochar; ST = Sustrato tradicional (comercial).

Las productividades en los sustratos que tienen corteza de pino no mostraron diferencias significativas en cuanto a la producción total y nacional de tallos florales de rosa; sin embargo, son significativas cuando se evalúa la cantidad de producción de rosas de exportación producida en el sustrato con 60CP combinada con 20FC o de biochar. El sustrato con el 80CP no mostró diferencias significativas con relación al tratamiento testigo o ST (comercial).

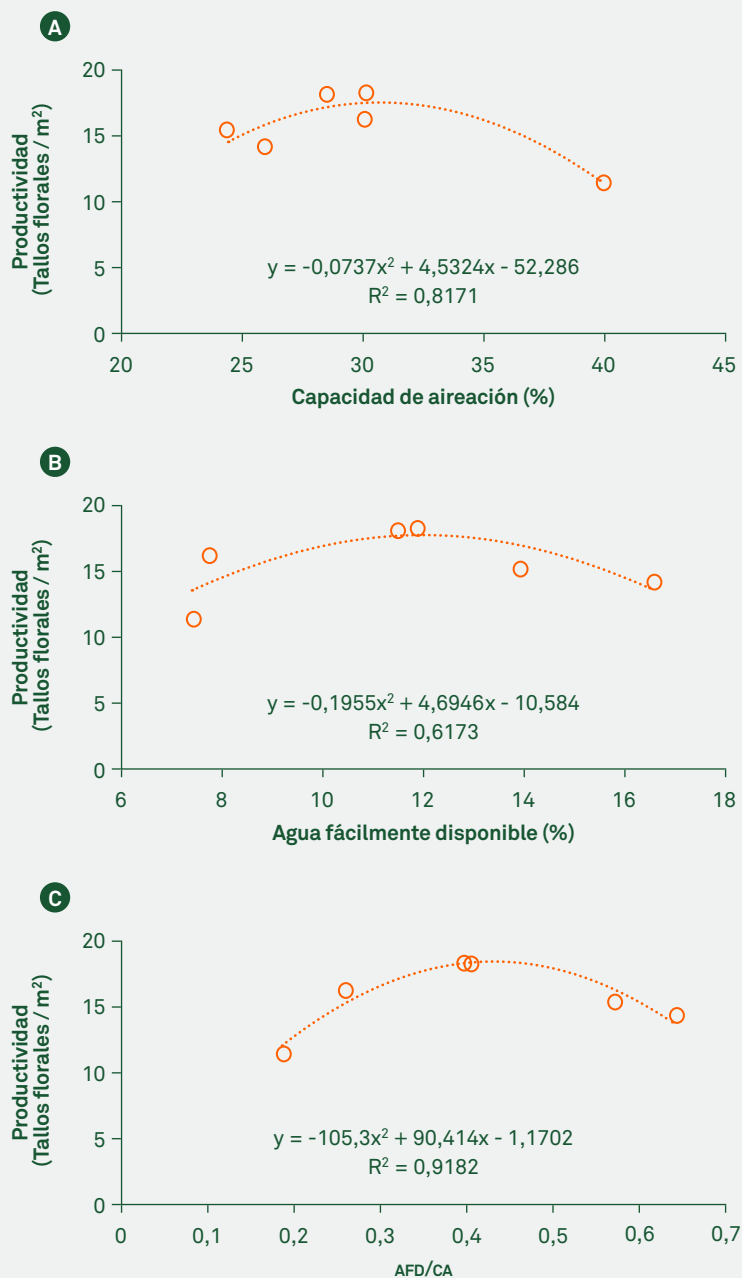
La figura 2.4 se elaboró con el objeto de observar si puede existir relación entre las propiedades hidrofísicas CA, AFD y AFD/CA del medio de cultivo con respecto a la productividad de flor calidad exportación. Las figuras 2.4A, 2.4B y 2.4C muestran que, aunque exista correlación entre ellas, no son monótonicamente crecientes, y por esa razón es difícil utilizar un coeficiente de correlación para estas, tal como lo expresan Helsel y Hirsch (2002) U. S. Geological Survey (USGS). No obstante, durante el periodo evaluado para cada uno de los sustratos, se encontró que la capacidad de aireación tiene una mayor correlación ( $R^2$ ) que el agua fácilmente disponible sobre la producción de tallos florales calidad exportación, como se observa en las figuras 2.4A y 2.4B, respectivamente.

➔ **Figura 2.3** Comparación de los promedios de productividad en tallos florales de rosa obtenidos en los sustratos que contienen corteza de pino y en el sustrato tradicional, considerando: **A.** Total de tallos; **B.** Tallos en el grado de calidad nacional; **C.** Tallos florales en grado de calidad tipo exportación.



FC = Fibra de coco; CP = Corteza de pino; BC = Biochar; ST = Sustrato tradicional (comercial).  
Promedios seguidos de la misma letra no muestran diferencias significativas por la prueba de Tukey.

➔ **Figura 2.4** Influencia de las propiedades hidrofísicas de los sustratos evaluados sobre la productividad de tallos florales de rosa calidad de exportación, a primer pico de producción. **A.** Capacidad de aireación (CA); **B.** Agua fácilmente disponible (AFD); **C.** Relación entre el agua fácilmente disponible y la capacidad de aireación.



Una vez se realiza la relación de productividad versus AFD/CA, se observa, como se esperaba, que lo que se requiere es un adecuado balance entre el AFD y la CA, mostrando una mayor correlación con la productividad de la flor de tipo exportación (figura 2.4C). De acuerdo con el ajuste de la ecuación, en primera instancia se observó que la mayor productividad se produjo con una relación AFD/CA de 0,40. Esto indica que los niveles de aireación deberían estar cercanos al 40 % del AFD. Los sustratos con la relación AFD/CA más cercana fueron los tratamientos 60CP:20BC y 20FC:60CP, los cuales fueron precisamente los que mostraron una mayor productividad de flor de tipo exportación. Por el contrario, los sustratos que presentaron índices muy altos (0,22) o muy bajos (0,11), como los sustratos 60FC:20BC y el ST, respectivamente, manifestaron la menor productividad de tallos florales en grados de calidad tipo exportación.

## 2.3 Conclusiones

- Se encontró que la pérdida de finos durante las primeras fases del crecimiento debe ser considerada de una forma rigurosa y relacionarla con las prácticas de fertirriego; por cuanto afecta la capacidad de retención de humedad del sustrato.
- Por su hidrofobicidad, la CAC puede generar problemas de manejo dada su tendencia a producir histéresis. Parecería no muy apropiado usar este material como sustrato.
- La aplicación de riego en el ST en las primeras etapas del cultivo, que busca garantizar un buen mojado del sustrato usando el riego por poma, puede aumentar la pérdida de finos del mismo.
- La CA y el AFD en los sustratos que contienen corteza de pino combinado con 20 % de biochar y 20 % de compost y con 20 % de FC y 20 % de compost fueron los sustratos que tuvieron unas relaciones de AFD/CA que influyeron en la productividad de flor de exportación.



**La mayor productividad de flor de exportación se produjo con la relación Agua Fácilmente Disponible (AFD)/Capacidad de Aireación de 0,40 (40 % del AFD), lo que indica la importancia de esta relación en el manejo del riego.**



- Los sustratos señalados generaron una productividad de flores de exportación, con diferencias significativas a un nivel del 5 %, comparado con los otros sustratos evaluados y por encima del ST, por lo que la productividad de tallos florales tipo exportación podría incrementarse con el uso de sustratos diferentes al tradicional.
- Los sustratos evaluados, con excepción de los que tenían un 60 % de CP, no presentaron diferencias significativas en términos de productividad en el total de tallos florales ni en la flor de calidad nacional.
- Para establecer un nuevo sustrato se requiere lograr una buena integración de las clases de materiales mezclados, su configuración granulométrica y las variables obtenidas de la CRH del sustrato, la CA y el AFD, especialmente.

## 2.4 Elementos necesarios para mejorar la aplicación del fertirriego



Al adoptar técnicas similares de la producción de clavel en la producción de rosa empezaron a emerger problemas relacionados con el sustrato y el fertirriego después del tercer año, con disminución de la productividad.

Con relación al manejo del riego, las diferentes empresas productoras de clavel en la Sabana de Bogotá utilizan técnicas muy similares para la producción; entre tres y siete pulsos de riego al día, más pulsos en periodos soleados y porcentajes de lixiviación similares, entre 30 y 60 %.

Los productores, al obtener resultados satisfactorios con el clavel, y gracias a intercambios de experiencias con las regiones productoras de rosa de otras latitudes, extrapolaron las técnicas usadas para el manejo del clavel, adaptaron aspectos relativamente simples como el tamaño del contenedor en razón al tamaño de la planta. Al reconocer que su ciclo de cultivo era mayor (se espera una duración entre 8 y 10 años), y que los requerimientos nutricionales variaban, ellos acometieron todo un proceso de producción para el cultivo de rosa. Sin embargo, una vez se empezaron a implementar técnicas muy similares para la producción de rosa, en los tres primeros años se encontraron ante una respuesta similar a

lo que acontecía con la producción de clavel. Los problemas empezaron a emerger después del tercer año, especialmente aquellos relacionados con el tipo de sustrato y la aplicación de fertirriego: se tropezaron con una respuesta de producción que mostraba que, a partir del tercer año, el cultivo empieza a disminuir su productividad<sup>6</sup>, y esto contrasta con la filosofía de la utilización de sustratos que señala que los agricultores generalmente aumentan la productividad mediante el incremento de aplicaciones tecnológicas y con el uso de sustratos, tal como lo expresan Raviv y Lieth (2008).

La técnica de producción de rosa emplea camas en el suelo, separadas por un contenedor de plástico (figura 2.5A) y otras elevadas del nivel del suelo, suspendidas en estructura de madera o metálica y a doble contenedor plástico (figura 2.5B), o en materas alineadas a lo largo de la cama (figura 2.5C).

➔ **Figura 2.5** A. Forma de siembra de rosa en camas con contenedores sobre el suelo; B. En camas con contenedores elevados; C. En materas que conforman hileras en las camas.

Fotografías tomadas por C.A. González-Murillo



6. Comunicación personal con directores técnicos de empresas productoras de rosa para exportación en sustrato.

De manera general, las camas dispuestas en el suelo las construyen a doble contenedor, cada uno de 0,40 alto  $\times$  0,40 ancho  $\times$  32 m largo, siguiendo la pendiente del diseño. Las camas elevadas sobre el suelo tienen unas medidas similares, aunque su conformación es parabólica en cada uno de los cuadros que conforman la cama y adicionalmente se les instala un sistema de recolección de drenaje (lixiviados), el cual casi siempre es monitoreado para conocer las características del pH y CE del lixiviado. La práctica general es monitorear pH y CE del fertirriego y de lixiviado; este mismo proceso se sigue en las camas conformadas por hileras de materas.

Los agricultores han observado que aproximadamente después de tres años el drenaje de los contenedores en el ST de mezclas de cascarilla de arroz cruda, quemada y compost se torna insuficiente; no parece cumplir con los requerimientos del cultivo. Ello ha sido verificado mediante la información generada de la producción de los cultivos de rosa. Ante esta situación, han llevado a cabo ciertas prácticas de mejoramiento de la aireación que buscan incrementar el drenaje del contenedor, tal como inyectar aireación con compresores por debajo de las camas, mejorar la composición interna del drenaje aumentando la cantidad de material muy grueso, gravas y escoria de carbón con diámetros promedios mayores a 5 mm<sup>7</sup>.

De la experiencia que se ha obtenido para el manejo del ST en clavel en la manipulación del sustrato se puede inferir lo que señalan González *et al.* (2006):

- Durante las primeras semanas del cultivo se produce un asentamiento del sustrato, y el drenaje va disminuyendo con el tiempo.
- En las camas elevadas con ST, durante las primeras semanas del cultivo se presenta una lixiviación con alto contenido de sedimentos, que para las camas de rosa en suelo no es posible observar. Durante estas primeras semanas de cultivo aquel sedimento que está drenando en aquellas camas en el suelo se deposita en el fondo.
- Dicho proceso de asentamiento, el cual tiene una relación directa con el grado de porosidad del sustrato y su capacidad de retención de humedad, es un indicador de

7. Información obtenida de visitas realizadas a diferentes empresas productoras de rosa para exportación.



que es necesario manejar apropiadamente el riego acorde con las condiciones del sustrato. El trabajo de Quintero *et al.* (2006) realizado con el sustrato tradicional en clavel mostró cómo las curvas de retención de humedad fueron variando con el tiempo y que el componente de partículas finas fue alto, mayor al 30 %, cuando se incluyó cascarilla de arroz quemada.

### 2.4.1 Ensayos realizados

En diversas fincas productoras de rosa de un grupo de exportadores de flores de corte ubicadas en la Sabana de Bogotá se llevaron a cabo mediciones en combinaciones de sustrato de 80 % de cascarilla de arroz cruda y quemada (tostada) y 20 % de compost, el cual se denomina genéricamente ST producido en la industria de flores, en el cultivo de rosa establecido en camas conformadas por contenedores. Los valores obtenidos de densidad aparente (figura 2.6A) y las curvas de retención de humedad (figura 2.6B) muestran su diferenciación a medida que el tiempo posterior a la siembra avanza, y dejan entrever que las prácticas de manejo del fertirriego tienen que ser cuidadosamente planeadas para que no afecten el contenido de aire del espacio poroso del sustrato.

La figura 2.6A revela una disminución del volumen total del sustrato, lo cual afecta de manera directa el espacio poroso total y deja menor espacio para manipular la relación espacio poroso ocupado con agua y con aire. Parte de los problemas observados se encuentran precisamente en que no satisfacen los requerimientos de las necesidades de aireación radicular de la planta.

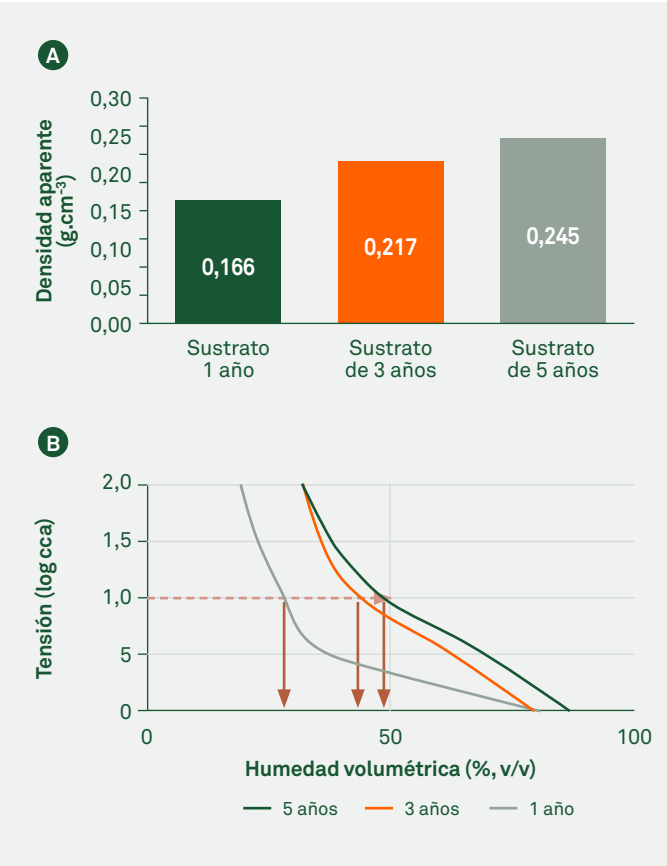
Estudiar la evolución de las propiedades físicas de los sustratos a lo largo del ciclo de cultivo es fundamental para propiciar un adecuado manejo del riego, y de esta forma evitar tanto el riesgo de anoxia en la zona radicular producto de la aplicación de agua en exceso, como el estrés por déficit de humedad en el contenedor. La variación de las principales propiedades físicas puede ser explicada por los efectos de la degradación de los materiales orgánicos (De Boodt y Verdonck, 1972), asentamiento y sedimentación de las



En el cultivo de rosa, después de tres años, el drenaje del contenedor en el sustrato tradicional de mezclas de cascarilla de arroz cruda, quemada y compost se torna insuficiente, sin cumplir los requerimientos del sistema.



➔ **Figura 2.6** **A.** Variación temporal de la densidad aparente del sustrato cascarilla de arroz quemada (ST); **B.** Curvas pF o de retención de humedad ajustadas al modelo de Brooks y Corey (1964) del sustrato tradicional (ST) en función del tiempo de establecimiento del cultivo de rosa en camas.



partículas finas que componen el medio de cultivo (Burés *et al.*, 1993), la compactación del sustrato debida a los regímenes de riego y al desarrollo de las raíces en los macroporos (Allaire-Leung *et al.*, 1999; Michel y Kerloch, 2017), entre otros.

Sandoval y González-Murillo (2020) instalaron pozos de observación en los sustratos en las camas de 40 cm de alto, con ST sobre el suelo. Los pozos de observación consisten en tubos de PVC de 1" de diámetro por 50 cm de longitud, perforados de forma helicoidal en la extensión del tubo con broca de 1/4", recubierto con geotextil para permitir la entrada de

agua sin sustrato, e instalados manualmente a lo largo de las camas. Este procedimiento se llevó a cabo en camas con tres años de instalación y en camas de 32 m de largo con sustrato soportadas directamente sobre el suelo, a los 8, 16 y 24 m desde su montaje. Las mediciones se efectuaron antes de iniciar los riegos del día.

Se denotaron los siguientes aspectos elementales:

- 1) Las figuras 2.7A y 2.7B muestran que en las camas en sustrato se presentaba un nivel freático (NF).
- 2) La figura 2.7B presenta la profundidad del nivel freático (PNF) a lo largo de la cama, la cual corresponde a aquella desde la superficie del sustrato hasta donde se encuentre el NF. Realizando una similitud con el drenaje tradicional de tierras agrícolas, se le puede llamar nivel freático colgado<sup>8</sup>, ya explícitamente señalado por Bilderback y Fonteno (1987), por cuanto el estrato impermeable es el final plástico del contenedor. Igualmente, se colige de la misma figura que, de acuerdo con las prácticas estandarizadas del riego en la finca donde se desarrolló el procedimiento, la PNF va variando en la medida en que se avanza en la cama. Se busca que el flujo de agua en el fondo del contenedor sea primordialmente horizontal, en el sentido de la pendiente del terreno adecuado.
- 3) La figura 2.7B muestra el comportamiento de la PNF cuando se aplica agua en exceso al sustrato. Se procedió a aumentar el riego a la cama de 300<sup>9</sup> a 400 L/día, y aunque la PNF se va disminuyendo, se comporta de forma similar.
- 4) La franja de sustrato saturado (figura 2.7A) corresponde a los 40 cm de la profundidad del contenedor menos la PNF. Por ende, se observa que en la medida en que se avanza en la longitud de la cama, aumenta la franja que está completamente saturada.
- 5) Los cambios de PNF después de 16 m de longitud de cama (figura 2.7B) se explican porque este tipo de camas se construyen

8. Los niveles freáticos colgados, denominado en inglés *pershed water table*, se presentan cuando la velocidad de infiltración del estrato inmediatamente superior es mayor que el inferior, producto de un suelo menos permeable, arcilla o un estrato endurecido por las labores de labranza, y empieza a generarse un nivel freático que no está conectado al nivel freático regional. En el caso de los sustratos es el fondo plástico de las materas o del contenedor.

9. Este valor de consumo aplicado por cama es de por sí alto para los valores usados en el medio, que alcanzan entre 120 y 180 L/día por cama.





En la configuración del sustrato el porcentaje de partículas finas debería estar por debajo del 20 %. Aunque estas mejoran la capacidad de retención, el riego las lava y generan problemas de drenaje en el contenedor.

para que se genere drenaje al final de esta, sin permitir un drenaje homogéneo en su longitud. Se espera que la solución salina excedente drene longitudinalmente hasta el final de la cama en función de la pendiente.

- 6) Al no existir un drenaje homogéneo ni suficiente en el fondo del contenedor, la franja saturada en el fondo va incrementándose (figura 2.7A) y elevando la posición del NF (figura 2.7B), así como ocupando un mayor espacio poroso.
- 7) Se debe reconocer que una vez se presente el nivel freático colgado en el fondo del contenedor, la zona saturada (40 cm – PNF) no corresponde solamente a aquella por debajo del nivel freático, sino que se presenta un ascenso capilar de agua a lo largo del contenedor, y la franja capilar de este ascenso dependerá de la granulometría del sustrato que se ha ido lavando al fondo. El contenido de humedad en esta franja capilar es muy cercano al contenido de humedad en saturación; es decir, una zona que puede llegar a contener volúmenes mayores a 10 % del volumen total del contenedor. En esta región, la planta va a estar sometida a falta de aireación, procesos de hipoxia que limitan el desarrollo radical y afectan finalmente la producción del cultivo.
- 8) Estos contenedores con ST, como el que se muestra en la figura 2.5A, son sometidos a una práctica de manejo de fertirriego muy tradicional en función del volumen de la solución lixiviada, la CE y el pH del lixiviado, aunque se desconoce en realidad cuánto se está drenando. La variación en la parte final de la cama a que hace referencia la figura 2.7B puede ser explicada por una tubería acondicionada al final de estas camas, que facilita el drenaje, o a rupturas del plástico de las mismas.
- 9) Tanto los contenedores de las camas de la figura 2.5B como los conformados por una hilera de materas pueden tener problemas similares, aunque menos pronunciados, porque, a diferencia de lo observado en la figura 2.7B, el drenaje vertical se puede mejorar de una forma más sencilla. No obstante, en estos conte-

nedores con ST después de tres años también empieza a notarse la disminución de la producción debido a los problemas de drenaje antes esbozados.

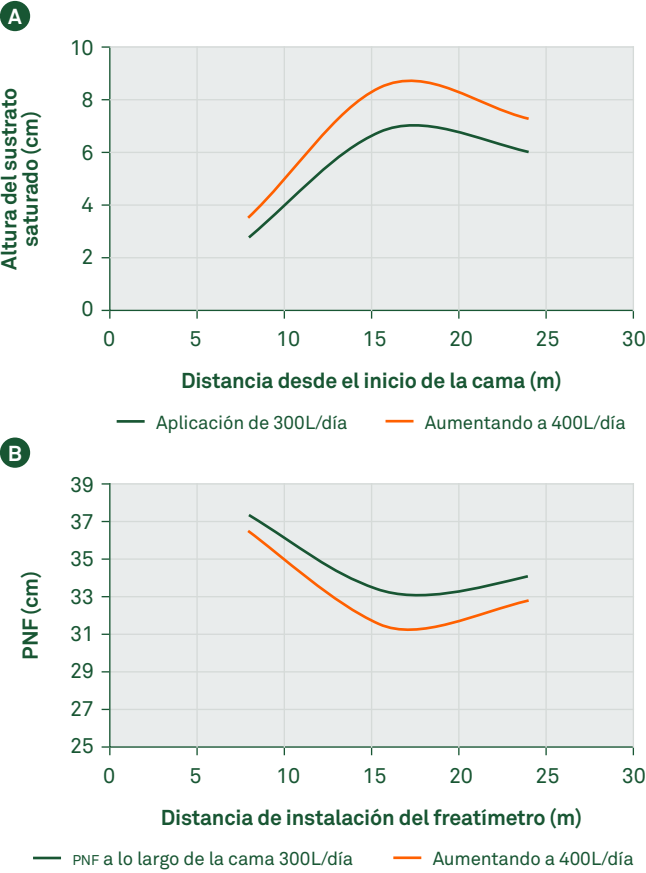
## 2.5 Caracterización física del sustrato

El estudio de las propiedades físicas debería ser el primer paso para luego diseñar un contenedor apropiado, teniendo en cuenta la disposición y el tamaño de las raíces, la retención de humedad y el espacio poroso de dicho material (Sambo *et al.*, 2008; Quintero *et al.*, 2013). Entre las investigaciones sobre la caracterización física de sustratos llevadas a cabo en el país están Cuervo *et al.* (2012), González *et al.* (2006), Quintero *et al.* (2006) y Quintero *et al.* (2011). En particular, y con base en información de Islam *et al.* (2002) y Ríos (2008), Quintero *et al.* (2017) resumen algunos parámetros de caracterización física para la densidad aparente de 0,1, 0,14, 0,29, y entre 0,12 y 0,14 kg L<sup>-1</sup> para cascarilla de arroz nueva carbonizada, cascarilla de arroz carbonizada usada, cascarilla de arroz quemada y cascarilla de arroz tostada, respectivamente; de igual forma, para estos mismos sustratos, la porosidad total correspondió a 71, 76,8, 79,2, y entre 82,4 y 92,2 %.

Con base en Quintero *et al.* (2011) se muestra que si se consideran las partículas finas como aquellas con diámetros menores al tamiz 30 (0,59 mm), los porcentajes de finos para la cascarilla de arroz quemada y reusada serían de 72 y 68,8 %, respectivamente. Los diámetros finos mejoran la capacidad de retención del sustrato; sin embargo, el riego los lava y genera problemas de movimiento de agua en el fondo del contenedor. Por ello, en la configuración de un buen sustrato es aconsejable que este porcentaje se mantenga por debajo del 20 % y, en consecuencia, planear mejor la aplicación del riego.

Los ensayos de Quintero *et al.* (2006) mostraron que la conductividad hidráulica del sustrato saturado para la cascarilla de arroz tostada está entre 30 y 32 m por día.

➔ **Figura 2.7** **A.** Variación de la altura de sustrato saturado o profundidad de la zona saturada desde el fondo del contenedor; **B.** Variación de la profundidad del nivel freático (PNF) desde la superficie del sustrato y a lo largo de la cama sobre el suelo, sin drenaje debajo. La aplicación de mayor cantidad de agua genera una elevación del nivel freático desde la superficie del suelo. Los valores corresponden a la profundidad desde la superficie del sustrato hasta donde el suelo está saturado.



### 2.5.1 Funcionalidad de la caracterización física

Las curvas de retención de humedad y de conductividad hidráulica se elaboran para estudiar la dinámica del agua en el sustrato. En nuestro medio, la aplicación de agua es uno de los aspectos que debe ser observado con mayor detenimiento en el manejo de sustratos. Se sugiere porque esta práctica se

realiza todavía de forma empírica, con una justificación respaldada en los resultados productivos que muestran la rentabilidad del proceso, dejando poco espacio para preguntarse si es la mejor y más eficiente forma de llevarla a cabo. Sin embargo, si se compara con la aplicación en el suelo, se advierte que, a pesar de los elementos comunes que los unen en la producción en sustrato, el volumen aplicado estaría dado en función del tipo de contenedor. La figura 2.4 muestra la estimación del volumen de agua requerido en un contenedor y el de almacenamiento en el volumen del suelo. Es preciso que los productores y el personal técnico encargado del fertirriego empiecen a reconocer estas conexiones entre la forma de estimación de los volúmenes de agua en el suelo y lo que se debería realizar en el sustrato.

Para comprender la diferencia que existe entre las CRH del suelo y del sustrato, se plantean los siguientes señalamientos:

- 1) Los mecanismos de retención de humedad en el suelo y en el sustrato son similares. Cuando el suelo o el sustrato tienen un contenido de humedad específico, correspondientemente esa cantidad de agua está retenida a una presión de succión específica.
- 2) Tanto en el suelo como en el sustrato saturados con agua, la presión a la que el agua está retenida es igual a la presión atmosférica, es decir, presión relativa igual a cero.
- 3) La presión a la que el agua es retenida contra la gravedad en el suelo, denominada capacidad de campo, es de 300\* cca; mientras que en el sustrato es de 10\* cca.
- 4) La presión a la que el suelo retiene con mucha mayor fuerza que los requerimientos evapotranspirativos, denominada punto de marchitez permanente, en el suelo es de 15 000\* cca, mientras que en el sustrato es de 200\* cca.
- 5) Cuando se aplica agua al sustrato o al suelo por encima de los contenidos de humedad correspondientes a 300 cca en el suelo o a 10 cca en el sustrato, el agua aplicada se drenaría por la fuerza de la gravedad<sup>10</sup>.

10. En el manejo de suelos se denomina contenido de humedad en capacidad de campo.

\* Valores indicativos que dependen del tipo de suelo o sustrato y su configuración granulométrica.







Con el tiempo la densidad aparente aumenta por la disminución del volumen y la capacidad de aireación (CA) disminuye. La CA es la diferencia entre los contenidos de humedad del sustrato saturado y el sustrato a 10 cca.

- 6) Cuando en el suelo se requiere agregar agua desde un contenido de humedad con base en volumen  $\theta_i$  hasta otro contenido de humedad  $\theta_{ii}$ , se determina como:

$$\text{Volumen} = \text{Área superficial por la cantidad de lámina aplicada} = (\theta_{ii} - \theta_i) * P * \text{Área}$$

donde P es la profundidad del suelo y

$(\theta_{ii} - \theta_i) * P$  corresponde a la lámina de agua por aplicar (figura 2.8B).

- 7) En el sustrato, el volumen dependerá de la forma del contenedor. Corresponde a:

$$\sum \Delta \text{Lámina (altura)} * (\text{Semisuma de los lados del trapecio}) = \text{área de llenado.}$$

El volumen corresponderá al área transversal del contenedor por su longitud (figura 2.8A). Para una materia, Bilderback y Fonteno (1987) presenta el volumen como el de un cono truncado igual a

$$= \frac{h * \pi}{3} \{ (base mayor^2) (base menor^2) (base mayor por base menor) \}$$

donde h es la altura entre las dos bases.

- 8) Tanto al suelo como al sustrato se les pueden determinar las CRH (figuras 2.9A y 2.9B); para el suelo se usan las ollas de presión y para el sustrato la mesa de tensión.

La información obtenida de las mesas de tensión para el sustrato se ajusta a un modelo de CRH y puede presentarse como se observa en la figura 2.10B. Los rangos de presión del agua en los sustratos pueden estar entre 0 y 200<sup>11</sup> cca; sin embargo, lo que normalmente se maneja en sustratos son los siguientes rangos:

- **Capacidad de aire (CA):** es el porcentaje en volumen de agua que se libera al aplicar una tensión de 10 cca sobre el sustrato. Obsérvese en la figura 2.6A cómo aumenta

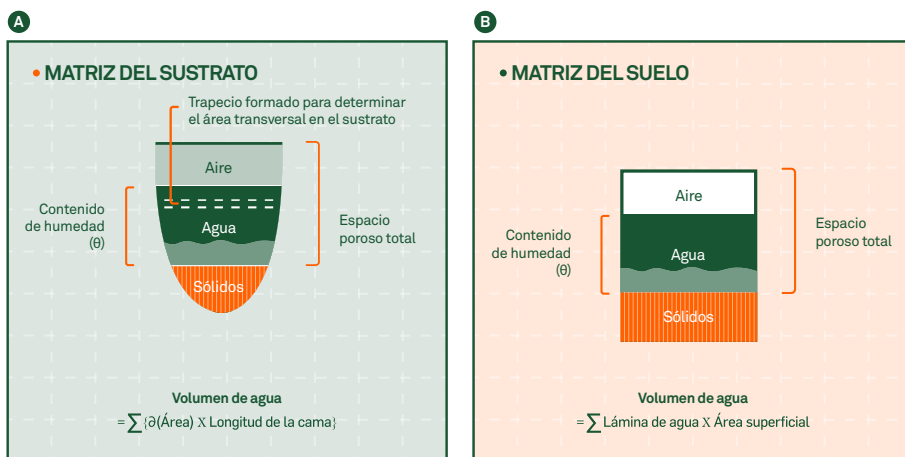
11. Normalmente como aparece en las definiciones, se expresa hasta 100 cca.

la densidad aparente por la disminución del volumen, y en la figura 2.6B cómo esta capacidad de aireación disminuye con el tiempo  $CA = (\theta_s - \theta_{h=10}) = (\mu_T - \theta_{h=10})$ . Diferencia entre contenido de humedad del sustrato saturado menos el contenido de humedad en el sustrato a 10 cca.

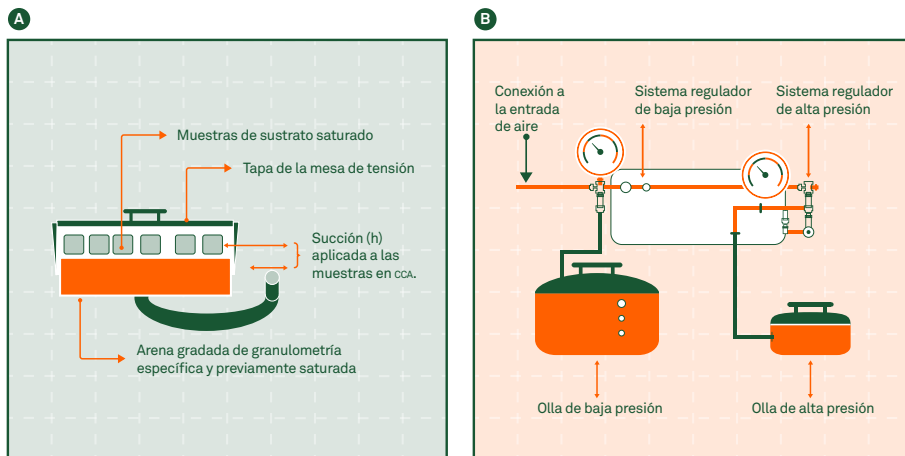
- *Agua fácilmente disponible (AFD)*: es el tanto por ciento en volumen de agua que se libera entre 10 y 50 cca sobre el sustrato.
- *Agua de reserva (AR)*: es el porcentaje en volumen de agua que se libera entre 50 y 100 cca de tensión sobre el sustrato.
- *Agua difícilmente disponible (ADD)*: es el contenido de humedad en tanto por ciento en volumen retenida a succiones superiores a 100 cca.
- *Espacio poroso total (EPT)*:  $\mu_T = \text{Espacio poroso total} = (\theta_s)$ . Espacio de aire y agua, formados por la suma de CA, AFD, AR y ADD. Se puede determinar a partir de las densidades reales y aparentes.

77

➔ **Figura 2.8** **A.** El volumen de agua en el contenedor corresponde a la suma de las áreas de los trapecios del contenedor multiplicada por la longitud del contenedor; **B.** En el suelo, el volumen se calcula por la altura de agua (lámina) por el área superficial.



➔ **Figura 2.9** A. Mesa de tensión para obtener los puntos de la curva de retención de humedad del sustrato. Trabaja aplicando succión a la muestra; B. Ollas y platos de presión empleados para suelo. Se utiliza una presión externa sobre la muestra.



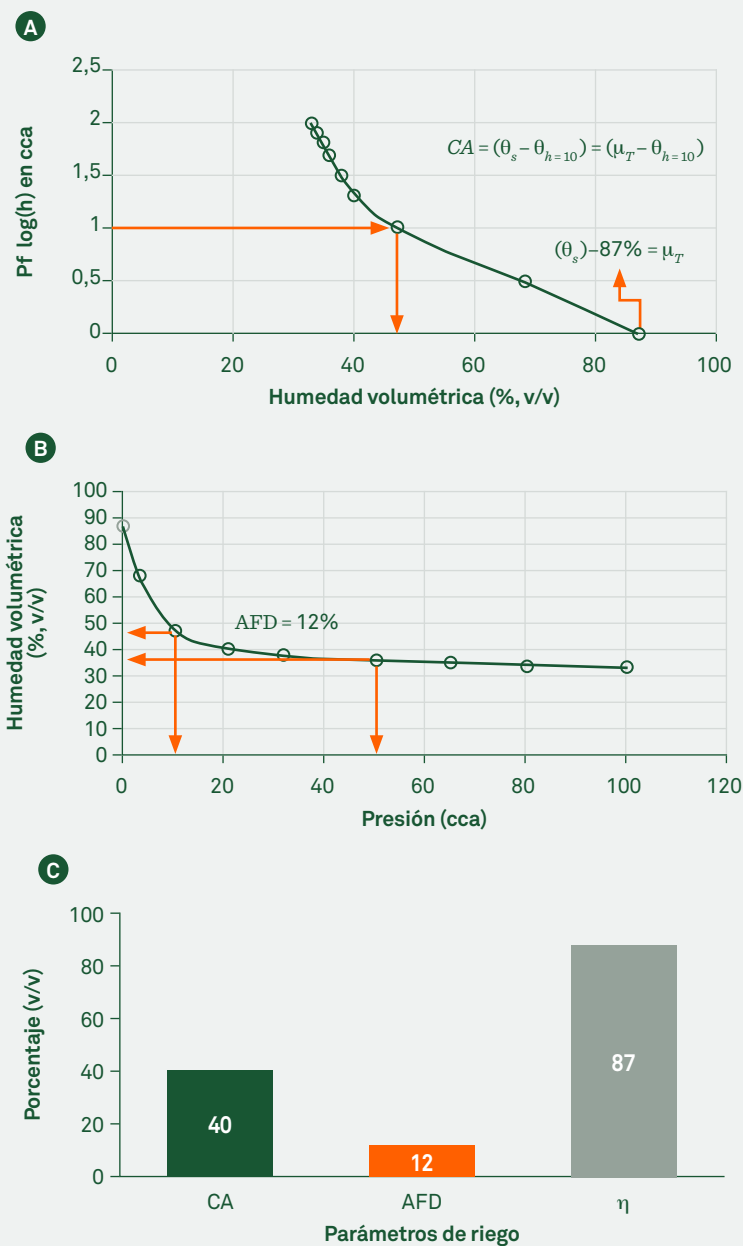
Quintero *et al.* (2011) presentan valores para algunos de los parámetros de riego previamente definidos. Se resalta que la mezcla con fibra de coco puede mejorar ostensiblemente la capacidad de retención de humedad; sin embargo, existen diferentes tipos de fibras, y se sugieren las fibras largas y no las parecidas a sustratos finos, muy procesados o picados.

En la actualidad se cuenta con diversas metodologías para tomar decisiones de riego: organoléptico, sensores de humedad, con base en la radiación solar y lisímetros de pesada. No obstante, el manejo del riego se da por lo general con base en la perspectiva personal de cada uno de los técnicos sin monitorear el estado hídrico de la planta o el suelo (Nikolaou *et al.*, 2019); se está subestimando así que el manejo del riego es fundamental para obtener el potencial de producción.

Para el riego en sustratos se deben tener en cuenta las consideraciones siguientes:

- 1) Los valores de la presión con la cual es retenida el agua en el sustrato, así como aquellos correspondientes a CA, AFD, AR y ADD, son relativamente bajos (figuras 2.10A y 2.10B).
- 2) Los tensiómetros deben tener sensores muy sensibles para que puedan ser confiables.

➔ **Figura 2.10** Curvas de retención de humedad para el sustrato tradicional (80 % de cascarilla de arroz quemada y 20 % de compost) con los datos de presión expresados en forma logarítmica en **A**, y con la información de presión real en **B**; **C**. Capacidad de aireación (CA), agua fácilmente disponible (AFD) y porosidad total ( $\eta$ ), como parámetros de riego obtenidos de las gráficas **A** y **B**.



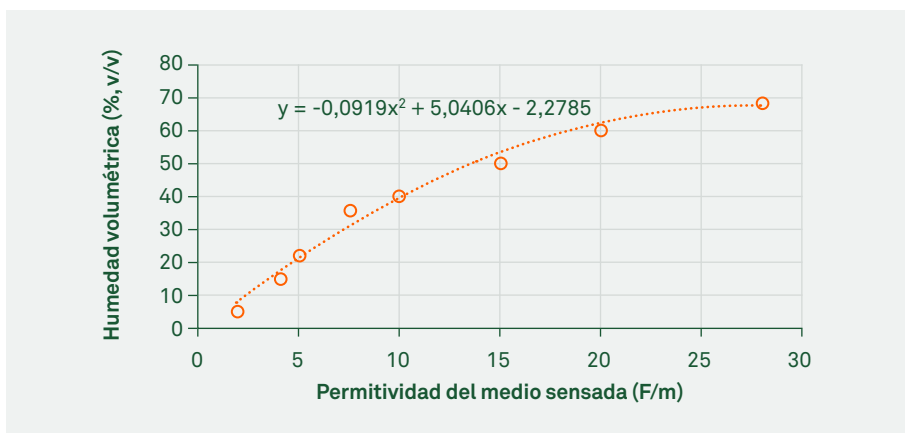


Cualquier sensor de humedad debe ser calibrado para un determinado sustrato. El monitoreo de la humedad se hace a lo largo y en la profundidad de la cama, lo que permite reconocer la homogeneidad del movimiento de agua.

- 3) Los tensiómetros tradicionales, con vacuómetro, no disponen de la sensibilidad requerida. Incluso para ser utilizados en el suelo, Susha Lekshmi *et al.* (2014) señalan que parecería que el uso de tensiómetros para la programación de riego puede causar sobreirrigación, a menos que su lectura se combine con mediciones del contenido de humedad del suelo.
- 4) Se sugiere realizar el monitoreo, preferiblemente con medidores de humedad. Con relación a los métodos de medición de humedad, Domínguez-Niño *et al.* (2020) indican que la selección del método se constituye en un compromiso entre su confiabilidad y su posible uso práctico. Igualmente arguyen, en concordancia con Kojima *et al.* (2016), Bogena *et al.* (2017) y Domínguez-Niño *et al.* (2019), que unos de los métodos más ampliamente usados son los sensores de tipo capacitivo, cuyo funcionamiento depende de la permitividad dieléctrica del suelo (sustrato) alrededor del sensor, la cual, a su vez, es función de su contenido de humedad. Tienen la ventaja de ser de bajo costo y requieren poco mantenimiento. Su uso en sustratos debe ser bien evaluado y contrastado con otros métodos o diferentes casas fabricantes. Adicionalmente, la permitividad es influenciada por la temperatura, así como por la conductividad eléctrica del medio (Kizito *et al.*, 2008; Kargas y Soulis, 2019).
- 5) Cualquier sensor de humedad que se vaya a utilizar tiene que ser calibrado para los sustratos específicos. Bogena *et al.* (2017) mostraron que la calibración específica del sensor mejora la precisión de la calibración comparada con una calibración universal.
- 6) Con relación a la calibración de un sensor capacitivo, realizado por Kargas y Soulis (2019), estos autores refieren que la calibración específica produce un mejor desempeño que la realizada por el fabricante. Las ecuaciones de calibración considerando los efectos de la conductividad eléctrica proveen mejor desempeño del sensor.

- 7) Lo anterior reafirma el supuesto de que no se debe confiar en las curvas que provienen del fabricante, especialmente para sustratos, donde se tiene material orgánico, alta porosidad y CE del fertirriego.
- 8) El protocolo para calibrar los sensores de humedad en dos tipos de sustratos se puede encontrar en González-Murillo y López-Zuluaga (2017). Los resultados esperados de este tipo de calibración se asemejan a lo presentado en la figura 2.11.

→ **Figura 2.11** Ejemplo de la información usada para realizar la curva de calibración del sensor capacitivo de humedad en sustrato.



81

## 2.6 Monitoreo del contenido de humedad del sustrato

Una vez se selecciona el sensor de humedad y se establecen los sitios de muestreo, es aconsejable monitorear la humedad a lo largo y en la profundidad de la cama. Este proceso permitirá reconocer cómo se está moviendo el agua verticalmente, así como su homogeneidad a lo largo de la cama. Se puede dilucidar si se están presentando excesos o déficits de humedad. Para este proceso es necesario tomar camas representativas, y recabar la información requerida de riego y drenaje de tal manera que permita tomar las medidas de manejo apropiadas para un normal desarrollo de las plantas.



Las figuras 2.12A y 2.12B muestran el monitoreo del contenido de humedad para el tipo de ST (80 % cascarilla de arroz quemada + 20 % compost), mientras que en la figura 2.12C están los resultados de un ST con otro porcentaje de composición entre cascarilla de arroz quemada, cruda y compost.

El monitoreo en las figuras 2.12A y 2.12B indica variaciones muy similares a las obtenidas con un instrumento mucho más preciso: el lisímetro de pesada (figura 2.12C). En el caso del monitoreo de la humedad teniendo en cuenta los niveles del AFD, se puede reconocer que esto permite señalar cuáles son los niveles de aplicación de riego que pueden implementar en función del tipo de sustrato.

En la figura 2.12A se observa cómo la parte superior del sustrato se mantiene a unos contenidos de humedad bajos; en la parte media, la utilizada para la programación de riego, los contenidos de humedad se presentan como los más variables, mientras que los contenidos de humedad de la parte inferior del sustrato se mantienen siempre altos. Se confirma lo reseñado con anterioridad, en el sentido de que en la parte inferior del sustrato se presenta un mayor contenido de humedad, producto de una mayor cantidad de finos que se han trasladado desde la parte superior, y, por tanto, también se corrobora el hecho de que generalmente en este tipo de sustratos el contenido de humedad en la parte superior se mantiene más bajo debido a que existe una mayor macroporosidad.

La figura 2.12B muestra que existe correlación entre la cantidad acumulada de horas de sol recibida y la ET del cultivo; es por esta razón que algunos controladores de riego utilizan este principio para aplicar los pulsos de riego en función del valor acumulado de radiación. El error en la aplicación de estos controladores estriba en que se realiza sin previa calibración a las condiciones reales, *in situ* donde los cultivos están sembrados, y, por ende, se pueden tener sub o sobrealimentaciones de fertirriego.

2.6.1 Los requerimientos de riego

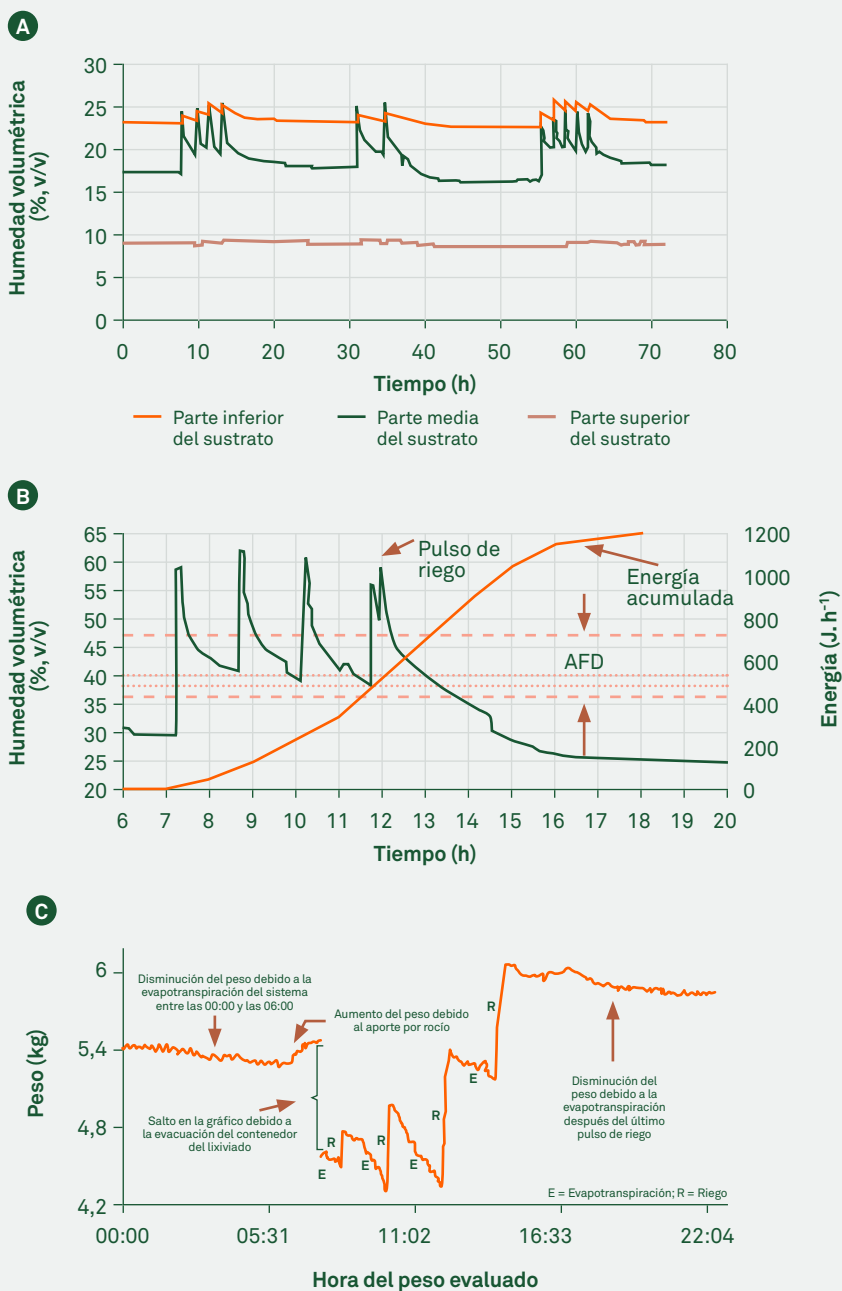
Nikolaou *et al.* (2019) señalan que existen diferentes estrategias de riego en función de las variables que se manejen o la forma como estas se interrelacionan. Una programación apropiada de riego es determinante en el manejo de los sustratos, por cuanto determina la cantidad y la disminución de la carga contaminante que se produce por las formas como se aplica una lámina de fertirriego para el control de la salinidad de la solución en el sustrato. En la tabla 2.4 se relacionan algunas de las propuestas que existen sobre la aplicación de fertirriego.

➔ **Tabla 2.4** Diferentes modelos de dosis de aplicación de fertirriego en sustratos.

Quintero <i>et al.</i> (2013)	Función de la CRH y forma del contenedor	$fr = f \frac{Lam_b}{Vs x AFD}$ $= f \frac{ET_c + (ET_c * f_d)}{Vs * (\Delta AFD x semana) + AFD_i}$ <p><math>f_r</math> = frecuencia de riego <math>V_s</math> = volumen del sustrato <math>f_d</math> = fracción de lavado o drenaje <math>ET_c</math> = ET real del cultivo <math>AFD</math> = agua fácilmente disponible <math>AFD_i</math> = agua fácilmente disponible inicial</p>
De Boodt y Verdonck (1972), Bilderback y Fonteno (1987)	Función del contenedor	Acorde con lo señalado en la figura 2.8
FAO (2017)	Función de la CRH	<p><math>AW_{cont.} = +0,64AW + 0,30P * 67h + 4,1.</math> <math>AW_{cont}</math> = calcula el agua disponible en el contenedor. <math>AW</math> (%) es el agua disponible entre 1 y 10 cca <math>P</math> (%) = porosidad del sustrato y <math>h</math> = altura del contenedor en m.</p>
Mavrogianopoulos (2015)	En función del contenedor. Pesado saturado y drenado = capacidad del sustrato (cs).	$Q = CS * AR * \frac{AFD}{f_D}$ <p><math>Q</math> = l/s <math>CS</math> = factor empírico de almacenamiento <math>AR</math> = agua de reserva desde 10 a 50 cca</p>



➔ **Figura 2.12** A. Monitoreo vertical del contenido de humedad del sustrato; B. Variación del contenido de humedad cuando se realiza la aplicación de pulsos de riego; C. Monitoreo del peso del contenedor obtenido a través de lisimetría de pesada (figura 8C tomada de González *et al.*, 2017).



## 2.7 Aspectos de relevancia química en el manejo de sustratos

En la solución del sustrato se encuentran sales minerales disueltas como una solución acuosa de diversa composición y concentración no homogénea, que conforman la fase líquida del sistema sustrato-raíz. Esta composición depende del material del que está formado el sustrato, y su concentración depende del contenido de humedad y del espacio poroso, aumentando la concentración a medida que disminuye el contenido de humedad. Esta concentración suele ser muy superior a la que es habitual en cultivos en suelo, lo que aumenta el riesgo de acumulación de sales disueltas, provocando alta salinidad en la solución del sustrato. Por esta razón, autores como Ansorena (1994), Jones *et al.* (2012) y Peil *et al.* (2012) resaltan la importancia de mantener una importante fracción de lavado en los sistemas de cultivo sin suelo.

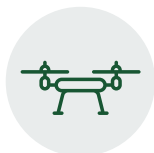
Quintero *et al.* (2017) señalan algunas de las causas de salinidad del sustrato:

- Aporte excesivo de sales con el agua de riego o con la solución nutritiva, por la utilización de aguas de mala calidad o por la reutilización de los drenajes, como es el caso de algunas fincas de flores en la Sabana de Bogotá.
- Por concentraciones elevadas de sales procedentes de algunos de los componentes del sustrato. En el caso de la cascarilla de arroz tostada o mezclas con esta o con compost, se presentan elevadas concentraciones de K,  $\text{NO}_3$  y Mn.
- Sustratos o componentes de sustrato (compost, cascarilla reutilizada) con una alta capacidad de intercambio catiónico (CIC), sumado a una rápida descomposición del material, hace que se liberen cantidades excesivas de sales al medio de cultivo, como sería el caso de la cascarilla de arroz y sustratos a base de cascarilla reutilizada o reciclada o mezclas con fibra de coco (Vélez *et al.*, 2014), que se suelen utilizar en los cultivos de clavel y rosa en la Sabana de Bogotá.



La concentración de solutos en la solución del sustrato suele ser superior a la habitual en cultivos en suelo, lo que aumenta la acumulación de sales disueltas; de ahí la importancia de mantener una fracción de lavado.





Es necesario  
monitorear  
de manera  
permanente las  
características  
físicas del sustrato  
a fin de manejar  
apropiadamente  
el fertirriego;  
ello implica  
esfuerzos en la  
producción del  
sustrato de manera  
homogénea y  
controlada.

- Las propiedades físicas y químicas del sustrato se modifican en la medida en que avanza el tiempo de uso con el cultivo de clavel y de rosa, entre otros, entre ellas la CIC, lo que modificaría su pH e incrementaría su concentración o almacenamiento de sales (Quintero *et al.*, 2011).

Esta salinidad puede provocar toxicidad específica de determinados iones (magnesio, sodio y boro). Los efectos de la salinidad se deben generalmente a un aporte excesivo de nutrientes minerales con el fertirriego, respecto de las cantidades absorbidas por las plantas y las pérdidas por lixiviación (principalmente nitrógeno y potasio) y a la acumulación de otros iones (como es el caso de sodio y cloro). El incremento en la salinidad en un sustrato puede corregirse o prevenirse mediante el control en los volúmenes de lixiviados (Terés, 2001; Evans *et al.*, 2011).

Por otro lado, es necesario ajustar las cantidades de fertilizantes requeridas por el cultivo y evitar las aplicaciones excesivas. En la práctica del riego en el cultivo en sustrato se aplica agua excedentaria, generando elevadas fracciones de lavado para evitar la acumulación de sales. Este exceso de agua aportada debería variar en función de la época del año, el estadio de desarrollo de la planta y la calidad del agua de riego de la finca. Estas situaciones pueden ser prevenidas, en gran parte, si se conocen las propiedades físicas y químicas, así como las variaciones que sufre el sustrato a lo largo de su ciclo de utilización. El conocimiento de estos factores integrados seguramente causará una mayor eficiencia y un mejor manejo del fertirriego.

## 2.8 Conclusiones sobre el manejo del riego

- 1) Las empresas de flores deben tener una planta de sustratos en función del área manejada. Esto permite la estandarización del sustrato usado en una determinada finca y facilitar la aplicación uniforme de fertirriego. De otra forma, se sugiere que la planta de sustratos

sea llevada a cabo en colaboración entre varias empresas, en virtud de que el manejo del riego depende de los porcentajes de mezcla usada, lo cual incide directamente en la CRH del sustrato.

- 2) Las empresas de flores han de hacer un monitoreo permanente de las características físicas del sustrato con el objeto de conocer cómo manejar apropiadamente el fertirriego. Ello implica un esfuerzo para realizar la caracterización física de los sustratos en sus propios laboratorios.
- 3) De acuerdo con los costos expresados por diferentes empresas productoras, parecería ser más barato establecer las camas directamente en el suelo, siempre y cuando se garantice que estas camas proporcionen un muy buen drenaje.
- 4) La aplicación de fertirriego debe responder a la combinación de AFD y CA del sustrato.
- 5) En la configuración del sustrato se debe propender por tener un apropiado porcentaje de finos, entre 20 y 30 %.
- 6) En las prácticas de manejo del riego se debe evitar el uso de la poma directamente al sustrato porque puede incidir en el lavado de finos.
- 7) Se debe monitorear el contenido de humedad a lo largo y en profundidad de camas tipo, y este valor asociarlo con la CRH, de tal forma que garantice una apropiada aplicación del riego.
- 8) Para los sensores de humedad por utilizar, las empresas de flores no deben confiar en las calibraciones universales y hacer sus propias calibraciones.
- 9) Se debería realizar un esfuerzo por identificar en el mismo contenedor cuál es la capacidad de retención, el AFD y la CA del sustrato a lo largo de la vida útil del cultivo.



## Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Nacional de Colombia, a la Asociación Colombiana de Exportadores de Flores (Asocolflores), al Centro de Innovación de la Floricultura Colombiana (Ceniflores), a la Universidad de La Salle, a la Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia) y, en especial, a la Gobernación de Cundinamarca por la posibilidad de participar en la ejecución del proyecto Fortalecimiento de la competitividad del sector floricultor colombiano mediante el uso de ciencia, tecnología e innovación aplicadas en Cundinamarca. De igual manera, a las compañías Brenntag Colombia S.A., Productos Químicos Andinos S.A. y Avgust Crop Protection, respectivamente, por el gentil suministro de las soluciones fertilizantes, los materiales plásticos de cubierta y los productos para control fitosanitario utilizados en esta investigación.

88

## Conflictos de interés y contribuciones de autoría

El manuscrito fue preparado y revisado de manera conjunta por los autores, quienes declaran no tener ningún conflicto de interés que comprometa la validez de los resultados aquí presentados.

## Referencias

- Allaire-Leung, S.E., J. Caron y L.E. Parent. 1999. Changes in physical properties of peat substrates during plant growth. *Can J. Soil Sci.* 79:137-139. DOI: 10.4141/S98-060.
- Ansorena, J. 1994. Sustratos. Propiedades y caracterización. Bilbao: Ediciones Mundi-Prensa. 172p.
- Barbaro, L.A., S.D.C. Imhoff y D.E. Morisigue. 2014. Evaluación de sustratos formulados con corteza de pino, pinocha y turba subtropical. *Cienc. Suelo*. 32(2):149-158. Disponi-

- ble en: [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1850-20672014000200001&lng=en&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672014000200001&lng=en&nrm=iso&tlng=es). Consulta: junio de 2020.
- Barrett, G.E., P.D. Alexander, J.S. Robinson y N.C. Bragg. 2016. Achieving environmentally sustainable growing media for soilless plant cultivation systems - A review. *Sci. Hortic.* 212:220-234. DOI: 10.1016/j.scienta.2016.09.030.
- Bilderback, T.E. y W.C. Fonteno. 1987. Effects of container geometry and media physical properties on air and water volumes in containers. *J. Environ. Hort.* 5(4):180-182. DOI: 10.24266/0738-2898-5.4.180.
- Bogena, H.R., J.A. Huisman, B. Schilling, A. Weuthen y H. Vereecken. 2017. Effective calibration of low-cost soil water content sensors. *Sensors*. 17(1):208. DOI: 10.3390/s17010208.
- Burés, S., F.A. Pokorny, D.P. Landau y A.M. Ferrenberg. 1993. Computer simulation of volume shrinkage after mixing container media components. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 118(6):757-761. DOI: 10.21273/jashs.118.6.757.
- Buitrón D., M.I., A.E. Pinta C., J. Tupac O. y M.M. Bonilla M. 2016. Evaluación de sustratos para el establecimiento de *Keikis de Epidendrum melinanthum schltr.* (Orchidaceae: laelinae) bajo condiciones de invernadero. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*. 12(2):136-141. DOI: 10.18359/rfcb.2024.
- Cannavo, P. y J.C. Michel. 2013. Peat particle size effects on spatial root distribution, and changes on hydraulic and aeration properties. *Sci. Hortic.* 151:11-21. DOI: 10.1016/j.scienta.2012.12.021.
- Caron, J., P. Morel, L.M. Rivière y G. Guillemain. 2010. Identifying appropriate methodology to diagnose aeration limitations with large peat and bark particles in growing media. *Can. J. Soil Sci.* DOI: 10.4141/CJSS09015.
- Caron, J. y V.K.N. Nkongolo. 1999. Aeration in growing media: Recent developments. *Acta Hortic.* 481:545-551. DOI: 10.17660/ActaHortic.1999.481.64.
- Chamindu D., T.K.K., J.C. Chen L., P. Møldrup, L. Wollensen de J. y M. Tuller. 2013. Integral parameters for characterizing water, energy, and aeration properties of soi-



- less plant growth media. *J. Hydrol.* 502:120-127. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.08.031.
- Cuervo B., W.J., V.J. Flórez R. y C.A. González M. 2012. Aspects to consider for optimizing a substrate culture system with drainage recycling. *Agron. Colomb.* 30(3):379-387. Disponible en: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/29029/47048>. Consulta: junio de 2020.
- De Boodt, M. y O. Verdonck. 1972. The physical properties of the substrates in horticulture. *Acta Hort.* 26:37-44. DOI: 10.17660/ActaHortic.1972.26.5.
- Domínguez-Niño, J.M., H.R. Bogen, J.A. Huisman, B. Schilling y J. Casadesús. 2019. On the accuracy of factory-calibrated low-cost soil water content sensors. *Sensors.* 19(14):3101. DOI: 10.3390/s19143101.
- Domínguez-Niño, J.M., J. Oliver-Manera, J. Girona y J. Casadesús. 2020. Differential irrigation scheduling by an automated algorithm of water balance tuned by capacitance-type soil moisture sensors. *Agric Water Manag.* 228. DOI: 10.1016/j.agwat.2019.105880.
- Evans, M.R., J.S. Buck y P. Sambo. 2011. The pH, electrical conductivity, and primary macronutrient concentration of sphagnum peat and ground parboiled fresh rice hull substrates over time in a greenhouse environment. *HortTechnology.* 21(1):103-108. DOI: 10.21273/HORTTECH.21.1.103.
- FAO. 2017. Good agricultural practices for greenhouse vegetable production in the South East European countries: Principles for sustainable intensification of smallholder farms. *FAO plant production and protection paper* 230. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations. 428p.
- Gayosso-Rodríguez, S., L. Borges-Gómez, E. Villanueva-Couoh, M.A. Estrada-Botello, R. Garruña-Hernández. 2016. Sustratos para producción de flores. *Agrociencia.* 50(5):617-631. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=302/30246698007>. Consulta: junio de 2020.

- González M., C.A., M.F. Quintero C., V. Meneses. 2006. Determinación de algunas propiedades hidrofísicas de los sustratos utilizados en cultivos de flores en la sabana de Bogotá. pp. 427-450. En: Flórez R., V.J., A. Fernández M., D. Miranda L., B. Chaves C. y J.M. Guzmán P. (eds.). Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. 502p.
- González M., C.A., Q.R. Quintero B., V.J. Flórez R. y H. Tafur H. 2017. Lisímetros de pesada. pp. 165-186. En: V.J. Flórez R. (ed.). Consideraciones sobre producción, manejo y poscosecha de flores de corte con énfasis en rosa y clavel. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. 210p.
- González-Murillo, C.A. y A. López-Zuluaga. 2017. Protocolo de calibración del sensor de humedad GS3 para la medición del contenido de humedad en sustratos. Laboratorio de Física de Suelos. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia. 4p.
- Helsel, D.R. y R.M. Hirsch. 2002. Statistical methods in water resources. Reston: USGS. 510p. Disponible en: <http://water.usgs.gov/pubs/twri/twri4a3/>. Consulta: 1.º de julio de 2020.
- Hernández-Apaolaza, L., A.M. Gascó, J.M. Gascó y F. Guerrero. 2005. Reuse of waste materials as growing media for ornamental plants. *Bioresour. Technol.* 96(1):125-131. DOI: 10.1016/j.biortech.2004.02.028.
- Hossain, S.S., L. Mathur y P.K. Roy. 2018. Rice husk/rice husk ash as an alternative source of silica in ceramics: A review. *J. Asian Ceram. Soc.* 6(4):299-313. DOI: 10.1080/21870764.2018.1539210.
- Huang, L., G. Niu, S.E. Feagley y M. Gu. 2019. Evaluation of a hardwood biochar and two composts mixes as replacements for a peat-based commercial substrate. *Ind. Crops. Prod.* 129:549-560. DOI: 10.1016/j.indcrop.2018.12.044.
- Ingram, D.L., R.W. Henley y T.H. Yeager. 1993. Growth media for container grown ornamental plants. En: University of Florida, IFAS Extension. 1-16. Disponible en <https://ufdc.ufl.edu/IR00004607/00001>. Consulta: junio de 2020.





- Islam, S., S. Khan, T. Ito, T. Maruo y Y. Shinohara. 2002. Characterization of the physico-chemical properties of environmentally friendly organic substrates in relation to rockwool. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 77(2):143-148.
- Jones, B.E.H., R.J. Haynes e I.R. Phillips. 2012. Addition of an organic amendment and/or residue mud to bauxite residue sand in order to improve its properties as a growth medium. *J. Environ. Manage.* 95(1):29-38. DOI: 10.1016/j.jenvman.2011.09.014.
- Kargas, G. y K.X. Soulis. 2019. Performance evaluation of a recently developed soil water content, dielectric permittivity, and bulk electrical conductivity electromagnetic sensor. *Agric. Water Manag.* 213:568-579. DOI: 10.1016/j.agwat.2018.11.002.
- Kizito, F., C.S. Campbell, G.S. Campbell, D.R. Cobos, B.L. Teare, B. Carter y J.W. Hopmans. 2008. Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor. *J. Hydrol.* 352(3-4):367-378. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2008.01.021.
- Kojima, Y., R. Shigeta, N. Miyamoto, Y. Shirahama, K. Nishioka, M. Mizoguchi y Y. Kawahara. 2016. Low-cost soil moisture profile probe using thin-film capacitors and a capacitive touch sensor. *Sensors.* 16(8):1-14. DOI: 10.3390/s16081292.
- Mavrogianopoulos, G.N. 2015. Irrigation dose according to substrate characteristics, in hydroponic systems. *Open Agric.* 1:1-6. DOI: 10.1515/opag-2016-0001.
- Michel, J.C. y E. Kerloch. 2017. Evolution of hydraulic properties and wettability of organic growing media during cultivation according to irrigation strategies. *Sci. Hortic.* 217:28-35. DOI: 10.1016/j.scienta.2017.01.023.
- Nikolaou, G., D. Neocleous, N. Katsoulas y C. Kittas. 2019. Irrigation of greenhouse crops. *Horticulturae.* 5(1):1-20. DOI: 10.3390/horticulturae5010007.
- Noguera M., P. 2000. Caracterización y evaluación agronómica del residuo de fibra de coco: un nuevo material para el cultivo en sustratos. Tesis de doctorado. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.

- Pardossi A. G. Carmassi, C. Diara, L. Incrocci, R. Maggini y D. Massa. 2011. Fertigation and substrate management in closed soilless culture. En: Euphoros report (Unipi). Disponible en: [https://www.wur.nl/upload\\_mm/8/c/0/aa4b4486-a9db-429f-8b03-f19d4ce-c3ee6\\_Fertigation%20and%20Substrate%20Management%20in%20Closed%20Soilless%20Culture.pdf](https://www.wur.nl/upload_mm/8/c/0/aa4b4486-a9db-429f-8b03-f19d4ce-c3ee6_Fertigation%20and%20Substrate%20Management%20in%20Closed%20Soilless%20Culture.pdf). Consulta: junio de 2020.
- Peil, R.M.N., A.S. Strassburger y L.A. da Fonseca. 2012. Growth, water consumption and use efficiency of summer squash crop in closed rice husk medium growing system. *Acta Hortic.* 952:645-650. DOI: 10.17660/Acta-Hortic.2012.952.81.
- Portillo-Rodríguez, A.M. 2013. Characterization of materials formed by rice husk for construction. *J. Phys. Conf. Ser.* 466(1):12-38. IOP Publishing. DOI: 10.1088/1742-6596/466/1/012038.
- Qi, G.F., J.C. Michel, S. Charpentier y P. Boivin. 2011. A laboratory method for measuring physical properties of growing media and their evolution during drying/wetting cycles: Preliminary results. *Acta Hortic.* 891:181-186. DOI: 10.17660/actahortic.2011.891.20.
- Quintero C., M.F., C.A. González M. y V.J. Flórez R. 2006. Evaluación de las características hidrofísicas de los sustratos cascarilla de arroz quemada, fibra de coco y sus mezclas. pp. 451-462. En: Flórez R., V.J., A. de la C. Fernández, D. Miranda L., B. Chaves C. y J.M. Guzmán P. (eds.). *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana*. Bogotá: Unibiblos. 502p.
- Quintero C., M.F., C.A. González M. y J.M. Guzmán P. 2011. Sustratos para cultivos hortícolas y flores de corte. pp. 79-108. En: Flórez R., V.J. (ed.). *Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo*. Bogotá: Unibiblos. 292p.
- Quintero, M.F., D. Ortega, J.L. Valenzuela y M. Guzmán. 2013. Variation of hydro-physical properties of burnt rice husk used for carnation crops: Improvement of fertigation criteria. *Sci. Hortic.* 154:82-87. DOI: 10.1016/j.scienta.2013.02.019.



- Quintero C., M.F., M. Guzmán P., C.A. González M., J.L. Valenzuela, J. Marín S. y P. Delgado S. 2017. Consideraciones sobre los cultivos sin suelo de clavel. pp. 11-32. En: Flórez R., V.J. (ed.). Consideraciones sobre producción, manejo y poscosecha de flores de corte con énfasis en rosa y clavel. Bogotá: Editorial Universidad Nacional de Colombia. 210p.
- Raviv, M. y J.M. Lieth. 2008. Significance of soilless culture in agriculture. pp. 1-10. En: Raviv, M. y J.M. Lieth. Soilless culture. Theory and practice. San Diego: Elsevier. 608p.
- Richards D., M. Lane y D.V. Beardsell. 1986. The influence of particle – size distribution in pinebark:sand:brown coal potting mixes on water supply, aeration and plant grown. Sci.Hortic.29:1-14.DOI:10.1016/0304-4238(86)90025-7.
- Ríos, J.M. 2008. Evaluación de nuevos sistemas de cultivos sin suelo para la producción de clavel estándar en condiciones de la Sabana de Bogotá. Práctica estudiantil. Programa Curricular de Ingeniería Agrícola, Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 15p.
- Rivas F., J. C., N. Mesa L. y D.M. Beltrán P. 2010. Utilización de la corteza de pino caribe (*Pinus caribaea*) como sustrato en cultivos de clavel hidropónico. Revista Tumbaga. 5:9-25. Disponible en: <http://revistas.ut.edu.co/index.php/ciencianimal/article/view/54>. Consulta: junio de 2020.
- Sahin, U., O. Anapali y S. Ercisli. 2002. Physico-chemical and physical properties of some substrates. Gartenbauwissenschaft. 67(2):55-60.
- Sandoval, A. y C.A. González-Murillo. 2020. Evaluación de las camas de sustratos para la producción de flores de corte. Primer reporte de pasantía: Evaluación del nivel freático. Reporte interno. Laboratorio de Física de Suelos. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia. 8p.
- Samartzidis, C., T. Awada, E. Maloupa, K. Radoglou y H.I. Constantinidou. 2005. Rose productivity and physiological responses to different substrates for soil-less

- culture. *Sci. Hortic.* 106(2):203-212. DOI: 10.1016/j.scienta.2005.02.020.
- Sambo, P., F. Sannazzaro y M.R. Evans. 2008. Physical properties of ground fresh rice hulls and sphagnum peat used for greenhouse root substrates. *HortTechnology*, 18(3):384-388. DOI: 10.21273/HORTTECH.18.3.384.
- Susha Lekshmi, S.U., D.N. Singh, M. Shojaei Baghini. 2014. A critical review of soil moisture measurement. *Measurement*. 54:92-105. DOI: 10.1016/j.measurement.2014.04.007.
- Terés T., V. 2001. Relaciones aire agua en sustratos de cultivo como base para el control de riego. Metodología de laboratorio y modelización. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. 483p.
- Van Genuchten, M.T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:892-898. DOI: 10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x.
- Vélez C., N.A., V.J. Flórez R. y A.F. Flórez R. 2014. Comportamiento de variables químicas en un sistema de cultivo sin suelo para clavel en la Sabana de Bogotá. *Rev. Fac. Nac. Agron. Medellín*. 67(2):7281-7290. DOI: 10.15446/rfnam.v67n2.44170.
- Wang, D., M.Z. Gabriel, D. Legard y T. Sjulín. 2016. Characteristics of growing media mixes and application for open-field production of strawberry (*Fragaria ananassa*). *Sci. Hortic.* 198:294-303. DOI: 10.1016/j.scienta.2015.11.023.
- Zou, Y. y T. Yang. 2019. Rice husk, rice husk ash and their applications. pp. 207-246. En: Ling-Zhi C. y X. Xuebing (eds.). *Rice bran and rice bran oil*. Shanghai: Academic Press y AOCs Press. 315p.



***“Trabajamos por un futuro donde podamos ver  
como nuestro amor por proteger a la tierra y a todos  
los que viven en ella, hizo una gran diferencia.”***



## **CERTIFICACIONES DEL ACEITE DE PALMA**



1-0267-18-100-00



CO-BIO-154  
Colombia Agriculture

## **NUESTROS PRODUCTOS**



Aceite crudo  
de palma



Aceite crudo  
de palmiste



Torta De  
Palmiste



Fibra  
Premium



Fibra \*materia prima  
para elaboración  
de sustratos



Cuesco



Compost

## **Contáctanos**

servicioalcliente@sanmarcos.com.co - coorproduccion@sanmarcos.com.co - cel:317 6354420

[www.sanmarcos.com.co](http://www.sanmarcos.com.co)



CONTENIDO



# 3

## CAPÍTULO



# Prototipo de sistema de fertirriego para investigación en ornamentales\*

César Augusto Navarro Salgado<sup>1</sup>, Carlos Alberto González-Murillo<sup>2</sup>,  
Ricardo Isaza Ruget<sup>3</sup> y Víctor Julio Flórez Roncancio<sup>4</sup>

## RESUMEN

**En la agricultura, las áreas experimentales** de investigación suelen ser relativamente grandes, lo cual aumenta costos y genera dificultades de manejo. El objetivo de este proyecto fue desarrollar un prototipo integral de sistema de fertirriego que permitiera el manejo de múltiples tratamientos de investigación de manera simultánea en un espacio limitado. Para este fin, en el Centro Agropecuario Marengo de la Universidad Nacional de Colombia, en un invernadero con un área experimental de 680 m<sup>2</sup>, se diseñaron e implementaron dos investigaciones: en rosa y clavel. Cada especie tuvo seis tratamientos de fertilización y seis de sustratos. Se requirieron doce sistemas prototipo de fertirriego (SPF) independientes. Se buscaba que cada SPF condujera una fórmula de fertirriego. Las fórmulas estándar para cada especie fueron usadas para los tratamientos de sustratos, lo cual facilitó que se emplearan como tratamientos testigos para la investigación de fertilización. Ello implica que se utilizaron dos SPF para la investigación en sustratos y diez SPF para la relacionada con fertilización. Cada SPF consistió en un

99

\* Para citar este capítulo: Navarro S., C.A., C.A. González-Murillo, R. Isaza R. y V.J. Flórez R. 2021. Prototipo de sistema de fertirriego para investigación en ornamentales. En: Flórez R., V.J. (ed.). Productos relevantes del proyecto Fortalecimiento de la competitividad del sector floricultor colombiano mediante el uso de ciencia, tecnología e innovación aplicadas en Cundinamarca. Bogotá:Ediciones Unisalle, Ceniflores. pp. 98-122.

1. Ingeniero en Automatización, Universidad de La Salle. Estudiante de maestría en Ingeniería Agrícola, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Colombia, sede Bogotá. Correo electrónico: canavarros@unal.edu.co - ORCID: 0000-0002-4039-1347.

2. Ingeniero agrícola, Universidad Nacional de Colombia – Universidad del Valle. Magíster en Hidrología, Universidad Nacional de Irlanda. Profesor asociado, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Colombia. Correo electrónico: cagonzalezmu@unal.edu.co - ORCID: 0000-0002-2920-8425.

3. Ingeniero electricista, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Profesor asistente, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Colombia, sede Bogotá. Correo electrónico: risazar@unal.edu.co - ORCID: 0000-0001-8959-6020.

4. Ingeniero agrónomo, Universidad Federal de Rio Grande del Sur (UFRRGS). Doctor en Ciencias, Universidad Estatal de Campinas (UNICAMP). Profesor asociado, Departamento de Agronomía, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Correo electrónico: vjflorezr@unal.edu.co - ORCID: 0000-0002-3081-2400.





sistema de bombeo compuesto por una motobomba eléctrica, un tanque hidroneumático, un presostato, un sistema hidráulico independiente, y sistemas de filtrado y control. Para el sistema de control se utilizaron dos tipos de controladores de riego: comercial, usado en jardinería, y otro diseñado y construido para manejar hasta ocho sistemas de bombeo. Durante el desarrollo de las diferentes investigaciones se obtuvieron eficiencias en la uniformidad del riego del cuarto inferior entre 82 y 100 %, y coeficientes de variación del caudal de los goteros entre 0,02 y 0,16. El porcentaje de lixiviación de la solución nutritiva fue calibrado durante el ensayo hasta obtener valores entre 20 y 60 %.

**Palabras clave:** *automatización, controlador de riego, flor de corte, riego por goteo.*

## ABSTRACT

**In agriculture, experimental research** areas are usually relatively large, which increases costs and creates management difficulties. This project aimed to develop a fertigation system (SPF) prototype allowing the management of multiple research treatments simultaneously in a limited space. For this purpose, in the Marengo Agricultural Center at the Universidad Nacional de Colombia, was carried out the experimental setup. It was used as an experimental area of 680 m<sup>2</sup>. Two research per specie (rose and carnation) were designed and implemented. Each species had six fertigation and six substrates treatments. Twelve independent SPF were required. Each SPF was intended to conduct only a single fertigation formula. The standard formulas for each species were used for the substrate treatments, which facilitated their use as control treatments for the fertilization investigation. This implies that two SPFs were used for research on substrates and ten SPFs for research related to fertilization. Each SPF consisted of a pumping system including an electric motor pump, a hydro-pneumatic tank, a pressure switch, a filtering system, an independent hydraulic system, and a control system. Two types of irrigation controllers were used for the control system: commercially used in gardening and

another designed and built to handle up to eight pumping systems. The performance of the SPF was obtained through the measurement of the low quarter efficiency, giving values within 82 and 100 %, the dripper discharge coefficients of variation ( $C_v$  0.02-0.16). The leaching percentage of the nutrient solution was calibrated during the test until obtaining values between 20 and 60 %.

**Keywords:** *automation, irrigation controller, cut flower, trickle irrigation.*



# Introducción

Fernández-Pacheco *et al.* (2015) señalan que, entre las diferentes tecnologías existentes para el adecuado manejo de los recursos de agua y energía, la automatización y las herramientas de control para los sistemas de riego son de gran trascendencia; igualmente expresan que muchos ejemplos de implementación de sistemas automatizados en el campo agrícola se refieren a procesos de automatización utilizando tecnología inalámbrica. Paralelo a esto, Osroosh *et al.* (2016) indican la importancia de la automatización del riego en procesos de investigación debido a que facilita el manejo en caso de requerir cambios en el régimen de riego y disminuye los requisitos de mano de obra. Turrall *et al.* (2010) presentan una visión de la situación actual de los sistemas de riego, y analizan los factores que afectan el rendimiento, el desarrollo y la modernización del riego; concluyen que se debe incluir en la inversión futura el desarrollo de proyectos en nichos específicos determinados por factores agroecológicos y económicos. Adicionalmente, Domínguez-Niño *et al.* (2020) muestran la importancia de la relación entre el tamaño de las huertas con la aplicación de riego, y cómo la automatización de dichos sistemas promueve el ahorro de agua y la disminución de impactos ambientales.

La independencia en sistemas de fertirriego para los tratamientos de un experimento es un factor determinante pues aumenta la confiabilidad del diseño estadístico (Ucar *et al.*, 2017). Otro factor fundamental es el manejo eficiente del agua, que se traduce en ahorro de tiempo y dinero (Melián-Navarro *et al.*, 2017). Una alta frecuencia en el riego evita problemas generados por estrés hídrico (Eiasu *et al.*, 2012). Para un buen manejo del recurso hídrico es conveniente utilizar la automatización puesto que mejora de manera sustancial la confiabilidad en los datos obtenidos en un experimento agronómico (Ooi *et al.*, 2010); sin embargo, la inversión económica en los sistemas de control y automatización para la agricultura tienen tiempos de retorno largos (Capraro *et al.*, 2010), motivo por el cual, para proyectos con tiempos de funcionamiento cortos y recursos limitados, es aconsejable

Los requerimientos limitaban el uso de un sistema de riego alimentado por una sola bomba, porque podrían presentarse mezclas en las fórmulas de fertilización, lo cual generaría ruido en la respuesta de las plantas.



realizar desarrollos apropiados y en función de los requerimientos del proyecto buscando minimizar los costos de este.

Teniendo en cuenta, entre otros aspectos, que el 17 % de las exportaciones mundiales de flores frescas provienen de Colombia, y que el país suministra el 74 % de las flores de corte que llegan a Estados Unidos en la celebración del día de San Valentín (Villamizar *et al.*, 2017), con Cundinamarca como el departamento que más contribuye con este sector, se desarrolló el proyecto Fortalecimiento de la competitividad del sector floricultor colombiano mediante el uso de ciencia, tecnología e innovación aplicadas en Cundinamarca.

La ejecución del proyecto tuvo lugar en las instalaciones del Centro Agropecuario Marengo (CAM) de la Universidad Nacional de Colombia, en un área experimental correspondiente a 680 m<sup>2</sup> de invernadero. En esta área se requería realizar investigaciones en rosa y clavel, en las cuales se buscaba discernir cuál sería el sustrato más apropiado y la mejor opción de fertilización para su desarrollo productivo, sin afectar parámetros preestablecidos de productividad y calidad. Para mejorar la fertilización se planteó disminuir la cantidad de N total mientras se incrementaba la relación amonio: nitrato (Baracaldo *et al.*, 2018; Baracaldo *et al.*, 2019). Ello precisaba unos sistemas de riego que evitaran mezclar las fórmulas de fertilización de los ensayos; es decir, debía buscarse independencia entre las diferentes tuberías desde la alimentación con la fórmula fertilizante hasta la aplicación a las plantas. Este presupuesto limitaba la posibilidad de utilizar un sistema de riego alimentado por una sola bomba, debido a que, de hacerse así, podrían presentarse mezclas en las fórmulas de fertilización, lo cual generaría ruidos en las respuestas de las especies y volvería más complejo su análisis. Esa circunstancia condujo a tener un total de doce sistemas prototipo de fertirriego (SPF) independientes. Por su naturaleza, la investigación desarrollada requería de independencia en la fórmula nutricional, y por tal razón se planteó el reto de diseño de infraestructura para investigación: ¿Es posible diseñar un módulo experimental de investigación que permita flexibilidad, facilidad de manejo y optimización de recursos con varios ensayos simultáneamente?





Se construyeron 12  
Sistemas Prototipo  
de Fertirriego (SPF)  
que permitieron  
un manejo  
autónomo de  
cada tratamiento.  
Para realizar  
comparaciones  
con otros sistemas  
se utilizó el factor  
Área / número de  
Tratamientos (AT).

Este ensayo tuvo por objetivo desarrollar un prototipo de sistemas de fertirriego (SPF) que hiciera factible el manejo de múltiples (doce) SPF independientes que manejaran 24 tratamientos de investigación de manera simultánea en un espacio limitado por el área experimental de 680 m<sup>2</sup>, en donde la aplicación de fertirriego tuviese completa independencia.

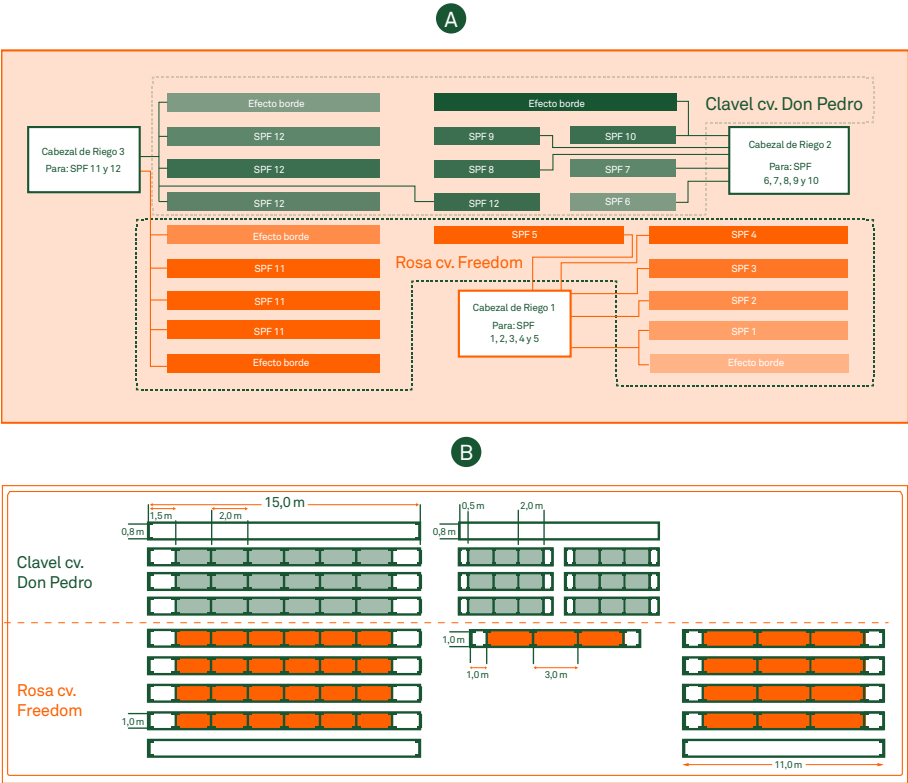
### 3.1 Materiales y métodos

#### 3.1.1 Sistema hidráulico y distribución del sistema

El área experimental está ubicada en el municipio de Mosquera, Centro Agropecuario Marengo (CAM) de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Allí se llevó a cabo el montaje de un invernadero tradicional tipo Flexon, con dos naves de 6,8 × 50 m, con diseño tipo capilla tradicional en estructura metálica, con ventilaciones lateral y cenital pasivas. En esta área se llevaron a cabo experimentos con los cultivos de rosa cv. Freedom y clavel cv. Don Pedro; cada especie tuvo seis tratamientos de fertilización y seis de sustratos. Se requirieron doce sistemas prototipo de fertirriego (SPF) independientes. Se buscaba que cada SPF solo condujera una fórmula de fertirriego. Las fórmulas estándar para cada especie fueron usadas para los tratamientos de sustratos, lo cual facilitó que se emplearan como tratamientos testigos para la investigación de fertilización. De allí que se utilizaron dos SPF para la investigación en sustratos (correspondiente a doce tratamientos, seis por cada especie) y diez SPF para la relacionada con fertilización (cinco por cada especie); en total, como se indicó, fueron construidos doce SPF. Con estas consideraciones se diseñó un sistema de riego integral que permitió un manejo autónomo de cada tratamiento de fertilización. Para realizar comparaciones con otros proyectos se sugirió emplear el factor AT, que consiste en la relación entre el área total del experimento y el número de tratamientos.

El presente desarrollo tiene un  $AT = 56,6 \text{ m}^2$ . Para garantizar la aleatoriedad de los tratamientos se diseñó la distribución tal como se muestra en la figura 3.1.

➔ **Figura 3.1** Sistema de riego y fertilización en el área experimental con los cultivos de rosa y clavel. **A.** Distribución de los SPF y disposición de los equipos, sus correspondientes replications y cabezales de riego; **B.** Dimensiones de las camas requeridas para los SPF y camas para efecto borde.



La caracterización de sustratos alternativos para rosa y clavel se realizó en las áreas correspondientes a los SPF 11 y 12, respectivamente (figura 3.1A). Para fines experimentales se requirió la construcción de cinco camas para clavel y cuatro para rosa. Con el fin de evitar el *efecto borde*, las camas de los extremos en cada uno de los ensayos y 1 m (rosa) y 1,5 m (clavel) en los extremos de las camas centrales restantes, no fueron tenidas en cuenta en el ensayo (figura 3.1B). Se empleó un diseño de bloques completamente

aleatorizados con tres bloques y seis tratamientos. La unidad experimental constó de una sección de cama de 0,8 m de ancho  $\times$  2 m de largo para clavel, mientras para rosa fue de 1 m de ancho  $\times$  2 m de largo (figura 3.1B). En este sector se ensayaron diferentes sustratos y la variable respuesta fue la producción del cultivo. Como cada cultivo tenía una fórmula comercial diferente (ensayos 11 y 12), a cada ensayo le correspondió un SPF.

Las investigaciones sobre los sustratos utilizados y parte de la problemática planteada para su manejo en el agroecosistema de la producción de flores de corte en la Sabana de Bogotá han sido abordadas, entre otros, por González-Murillo *et al.* (2006), Quintero-Castellanos *et al.* (2006), Quintero-Castellanos *et al.* (2011), Quintero *et al.* (2012) y Quintero *et al.* (2017). Los resultados de dichos trabajos han mostrado que es preciso buscar un sustrato más estable para la industria floricultora en la Sabana de Bogotá, debido a que el sustrato comercial que se utiliza en la actualidad genera problemas de compactación y disminución de la aireación. Por otra parte, se presentan niveles freáticos colgados, que con el tiempo afectan la productividad y calidad de los tallos florales, especialmente en la producción de rosa; de ahí que se planteó investigar diferentes sustratos alternativos. En la figura 3.2A se muestra una visión panorámica del ensayo de evaluación de sustratos promisorios para su uso en clavel.

Investigadores como Henao y Flórez (2006) presentaron una de las primeras aproximaciones sobre el potencial contaminante de las soluciones salinas lixiviadas de las camas suspendidas, características de los sistemas productivos de clavel y rosa en sustratos orgánicos que para la época se establecían en la Sabana de Bogotá. En ese reporte, los autores encontraron que los niveles de sulfatos, fosfatos y nitratos estaban ampliamente por fuera de los que la literatura cataloga como adecuados, y que para hacer un manejo correcto de la fertirrigación se podrían minimizar los aportes de las fuentes de N, P y S. La concentración de  $\text{NO}_3^-$  en la composición química del lixiviado en el cultivo de rosa varió de 669  $\text{mg L}^{-1}$  en el sustrato 100 % fibra de coco a 1756  $\text{mg L}^{-1}$  en el

sustrato 100 % cascarilla de arroz quemada. En clavel, varió de 1072 mg L<sup>-1</sup> en 35 % cascarilla de arroz quemada a 968 mg L<sup>-1</sup> en 100 % cascarilla de arroz quemada.

Luego, los trabajos exploratorios sobre la investigación para buscar disminuir el N total en las fórmulas de fertirriego en rosa y clavel derivado de la problemática ambiental planteada por la concentración excesiva de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en el lixiviado, en consecuencia de la aplicación de una fórmula de fertilización estándar, fueron inicialmente presentados por Casas-Ortiz (2015) y Casas *et al.* (2016). Más recientemente, en el marco del proyecto de investigación Fortalecimiento de la competitividad del sector floricultor colombiano mediante el uso de ciencia, tecnología e innovación aplicadas en Cundinamarca se avanzó en esa línea de investigación que busca profundizar en las estrategias para disminuir la concentración de N total y optimizar la relación amonio:nitrato en la fórmula de fertirriego, con la finalidad última de disminuir la concentración de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en el lixiviado. Los trabajos de Baracaldo *et al.* (2017, 2018 y 2019) fueron desarrollados en los SPF numerados 1 a 10. Con ese propósito se requirieron diez prototipos de sistema de fertirriego (SPF) independientes, para evitar la posibilidad de que en las tuberías de fertirriego se mezclaran formulaciones diferentes (figuras 3.1A y 3.2B). Los tratamientos testigos de estos ensayos correspondieron a las fórmulas de fertirriego comerciales empleadas en el sector floricultor, y también se utilizaron en los ensayos realizados con la investigación de sustratos, en el mismo sustrato que se usó para los tratamientos de fertilización. En otras palabras, al experimento llevado a cabo para determinar el mejor sustrato se le aplicó la fórmula comercial usada en cada especie, para todos los tratamientos. Es por ello que, a pesar de que en cada experimento haya seis tratamientos de sustratos por especie, se requería solamente un SPF por especie.

Una base de concreto con cinco SPF construidos se muestra en la figura 3.2C. Cada SPF está compuesto por un tanque de almacenamiento de 500 L con agua fertilizada, moto-bomba centrífuga eléctrica monofásica de 1/2 hp con caudal máximo de 30 L min<sup>-1</sup> y cabeza dinámica máxima de 40 mca



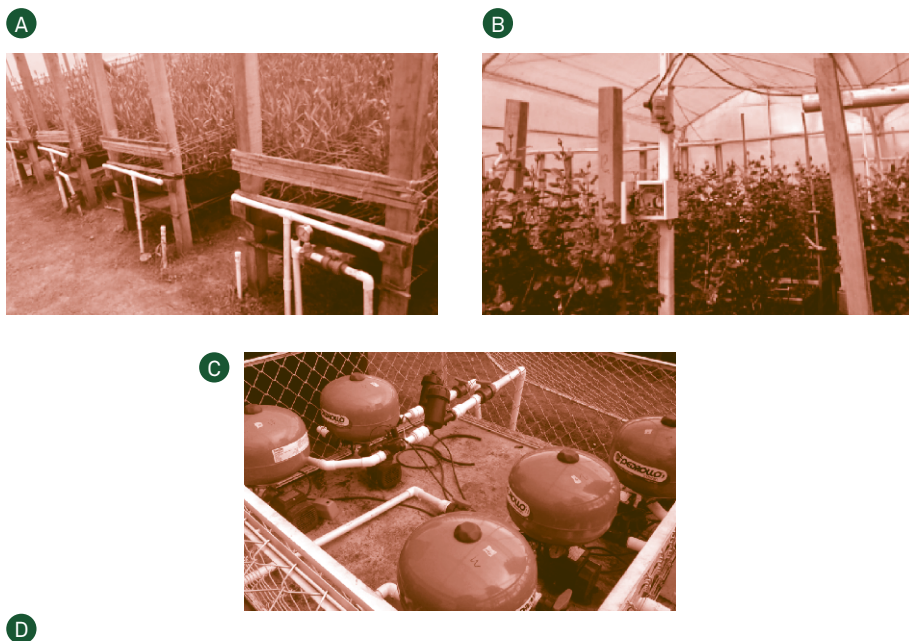
Es preciso buscar un sustrato más estable para la floricultura en razón a que el usado actualmente genera compactación, disminución de aireación y presentan niveles freáticos colgados que afectan productividad y calidad.





(392,2 kPa), tanque hidroneumático de 24 L con manómetro y presostato, filtro de malla de 120 mesh, electroválvula solenoide 24 VAC /200 mA con regulador de presión, manguera de goteo de 12 mm con goteros espaciados a 20 cm y caudal de  $1,2 \text{ L h}^{-1}$  (figura 3.2D).

➔ **Figura 3.2** A. Experimento de evaluación de sustratos alternativos para el cultivo de clavel; B. Experimento de disminución de la concentración de N total y optimización de la relación amonio-nitrato en la fórmula de fertirriego en el cultivo de rosa; C. Prototipos de sistema de fertirriego SPF implementados; D. Diagrama del SPF utilizado.



Para el diseño hidráulico se realizaron cálculos de pérdidas de energía por fricción en tuberías y accesorios, en donde la diferencia máxima de la pérdida de energía de cada sector no superaba el 20 % de la presión de operación para asegurar uniformidad en riego (Pizarro, 1996). Cada sistema de riego puede ser activado de manera independiente; cinco de estos sistemas, accionados con controladores de riego comerciales para jardinería. Para controlar los otros siete sistemas, se diseñó un controlador de riego que permite administrar la lámina de agua aplicable en cada uno de los SPF.

### 3.1.2 Requerimientos de diseño del sistema de control

Según las visitas realizadas y la experiencia de campo, el volumen de agua fertilizada por aplicar en un cultivo de clavel o rosa varía entre 90 y 120 L cama/día. La cantidad de agua debe ser distribuida durante el día entre 3 y 7 pulsos de riego, teniendo en cuenta el manejo comercial en la zona. Bolla *et al.* (2009) señalan que cinco pulsos diarios son suficientes para cultivos de clavel y rosa, y Osroosh *et al.* (2016) indican la importancia de que en el sistema automatizado se pueda modificar el régimen de riego con facilidad; por ello, se sugiere que el controlador de riego pueda ser modificado de manera sencilla para aumentar la flexibilidad del equipo.

109

### 3.1.3 Diseño del controlador de riego

La conceptualización inicial del controlador se realiza acorde con las recomendaciones de Pérez y Martín (2008). Según Mich *et al.* (2015), en cualquier sistema automatizado se requiere de una interfaz que permita interactuar al usuario con el sistema y hacer ajustes de manera sencilla (interfaz hombre máquina, HMI, por sus siglas en inglés). Para el caso puntual de sistemas de control, Valera *et al.* (2014) señalan que es necesario que una HMI tenga un sistema que permita visualizar la información y un sistema que haga posible





La interfaz hombre máquina (HMI) debe permitir visualizar y modificar la información. Se utilizó una HMI con pantalla, teclado matricial, tarjeta de control, reloj, etapa de potencia y baterías (independencia energética).

modificarla. Teniendo en cuenta lo anterior, se crea una HMI con una pantalla y un teclado matricial 4×4; el sistema interno está compuesto de una tarjeta de control, un reloj en tiempo real, etapa de potencia y baterías, con lo que se obtiene independencia energética de aproximadamente 36 horas (figuras 3.3B y 3.3C).

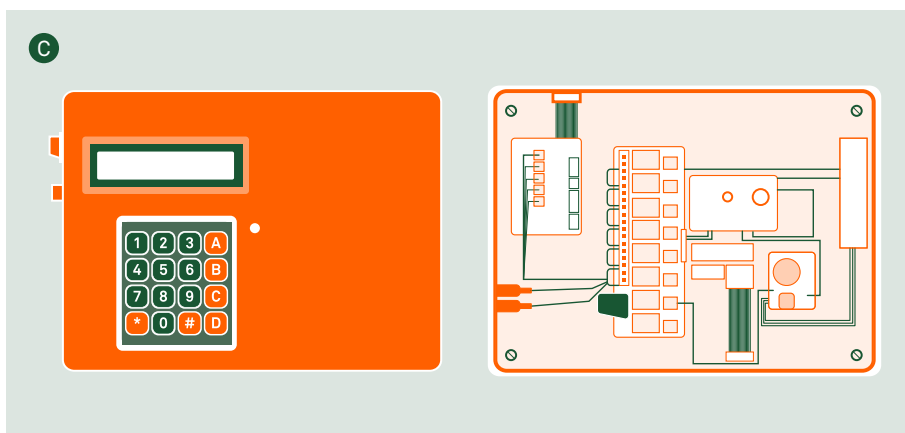
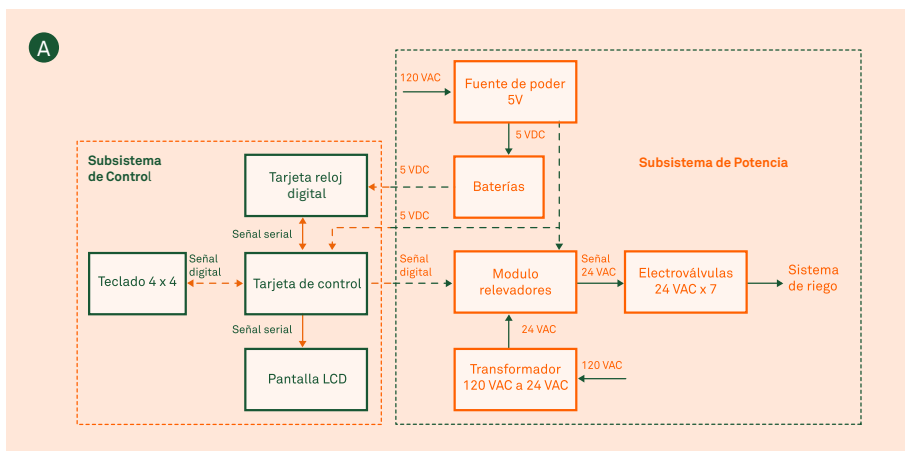
La información ingresada por el usuario comprende la válvula de control de riego, el número de riegos por día (pulsos por día), el tiempo inicial y final del pulso, utilizando un teclado matricial 4×4. Esta información se muestra en una pantalla LCD con la que el usuario no solo interactúa, sino que le permite corregir o validar la información ingresada. Con esta información el controlador energizará las válvulas de aplicación correspondientes a cada uno de los siete SPF.

Las salidas del controlador de riego son de tipo serial. Para alimentar cada válvula que trabaja a 24 VAC, se utiliza un transformador 110 VAC - 24 VAC. Binda *et al.* (2008) en lo relacionado con el control de fuentes conmutadas, recomiendan utilizar optoacopladores para aislar físicamente el circuito de control de la etapa de potencia; Schugurensky y Capraro (2006) sugieren utilizar una fuente conmutada para alimentar el sistema, la cual no se afecta por cambios en la tensión de alimentación de la fuente de poder. En la figura 3.3A se muestra el diagrama de cajas del controlador desarrollado.

Como respaldo, el sistema tiene concebido e implementado un set de baterías para el controlador, dado que en las zonas rurales es muy común los cortes frecuentes de energía.

Lu y Nguyen (2012) recomiendan microcontroladores robustos y de bajo costo para aplicaciones industriales, entre los cuales se encuentra la marca Picaxe. Spence *et al.* (2018) aconsejan el uso de microcontroladores Picaxe para aplicaciones agrícolas, pues han tenido éxito en la construcción de satélites y pueden soportar ambientes hostiles. Teniendo en cuenta lo anterior, el número de entradas y salidas necesarias, se realiza el programa de control con un microcontrolador Picaxe 28×2.

➔ **Figura 3.3** A. Diagrama de bloques del controlador de riego; B. Interfaz HMI del controlador de riego; C. Controlador de riego terminado.



### 3.1.4 Seguimiento del sistema hidráulico

Se implementaron controles para corrección permanente de los volúmenes aplicados por la bomba, con el fin de determinar diariamente los ajustes particulares necesarios para permitir un correcto funcionamiento del sistema. Lorenzo *et al.* (1993) recomiendan que el volumen de lixiviado debe encontrarse entre 20 y 50 % del riego aplicado para garantizar condiciones de CE óptimas en el sustrato; por ende, se requieren los aforos para cada cama correspondiente a todas las unidades SPF. Siguiendo la metodología descrita por Merriam y Keller (1978), el aforo consistió en determinar el volumen de agua y el tiempo de llenado de los goteros usando probetas calibradas de 150 mL y medición del caudal promedio por triplicado en cada gotero.

#### 3.1.4.1 Parámetros de diseño

Los requerimientos de la investigación sobre la aplicación de nitrógeno en rosa están señalados en Baracaldo *et al.* (2017), y para clavel en Baracaldo *et al.* (2018 y 2019). Tanto en rosa como en clavel se utilizaron seis tratamientos correspondientes a dos de nitrógeno total y tres formulaciones de relación nitrato:amonio, más el tratamiento testigo comercial que se derivó del usado para el experimento de sustratos; así, para los experimentos de evaluación de sustratos se requirió un total de 12 SPF. Para el manejo agronómico de los cultivos se tuvo en cuenta lo descrito en Flórez *et al.* (2006).

## 3.2 Resultados relevantes

Lo presentado trata de resumir los resultados de las investigaciones obtenidas con el prototipo SPF, buscando mostrar cómo este prototipo puede ser fácilmente implementado y se constituiría en una herramienta útil y de bajo costo para realizar experimentación en invernaderos y a campo abierto. López-Zuluaga *et al.* (2017a) encontraron que en los sustratos con composición igual o superior al 60 % de corteza de pino se observó una tendencia a producir menor proporción

de tallos de calidad nacional. Con base en estos resultados, una alta proporción de corteza de pino en la mezcla del sustrato tendría un efecto positivo en la calidad de los tallos florales de rosa. De forma similar, López-Zuluaga *et al.* (2017b) concluyen que los sustratos a base de corteza de pino podrían constituirse en una alternativa para el cultivo de clavel en sistemas de cultivo sin suelo.

Baracaldo *et al.* (2018) encontraron para el cultivo de clavel estudiado que la reducción de N total al 30 % disminuye significativamente la pérdida de N por lixiviación a la semana 16 ( $49,5 \% < \text{NO}_3^-$ ) y 26 ( $41,1 \% < \text{NO}_3^-$ ) después de la siembra; la reducción de nitrógeno total y el incremento de la relación  $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$  modificó los contenidos de nutrientes en el tejido vegetal de clavel. Para los resultados obtenidos en el experimento, que buscó disminuir N en rosa, Baracaldo *et al.* (2017) mencionan que las plantas con mayor número de tallos por planta y de mejor calidad fueron las del tratamiento con menos nitrógeno total y la relación 24:76. Este tratamiento produjo tallos florales con mayor longitud y diámetro, así como mayor número de hojas, masa seca y área foliar. La disminución de N total influyó en la absorción significativamente mayor de K, Mg y Fe, y el aumento de amonio promovió una absorción significativamente mayor de B en el tejido vegetal.

Baracaldo *et al.* (2018) señalan que en clavel el contenido de nitrógeno en el tejido vegetal no presentó diferencia estadística significativa, contrario a los resultados reportados por Cabrera (2003), mientras que el contenido de N en el lixiviado fue significativamente mayor en los tratamientos con altas dosis de nitrógeno.

Según Ramírez (2009), los experimentos agronómicos normalmente son realizados en áreas extensas, y para poder compararlos se determina el factor AT, es decir, la relación que existe entre el área total del experimento y el número de tratamientos. Al respecto, Esmeral (2011b) y Esmeral *et al.* (2011a) llevaron a cabo experimentos en plantas de rosa cv. Charlotte injertadas sobre Natal briar con  $\text{AT} = 56 \text{ m}^2$ ; Arévalo-H. *et al.* (2013) realizaron experimentos en rosa cv. Freedom en un área de  $5200 \text{ m}^2$  con tres tratamientos y AT



Los experimentos agronómicos normalmente se realizan en áreas extensas y para compararlos se determinó el factor AT (área total del experimento / número de tratamientos). El presente desarrollo tiene un  $\text{AT} = 56,6 \text{ m}^2$ .



= 1733 m<sup>2</sup>; Ucar *et al.* (2017) desarrollaron experimentos en rosa cv. Damascena en un área de 1530 m<sup>2</sup> con cuatro tratamientos y AT = 382,5 m<sup>2</sup>; Katsoulas *et al.* (2006) efectuaron experimentos en rosa cv. First Red, en un área de 200 m<sup>2</sup> con dos tratamientos y AT = 100 m<sup>2</sup>; Gerçek *et al.* (2017) mencionan un experimento realizado con tomate en un área de 160 m<sup>2</sup> con dos tratamientos y AT = 80, y Li *et al.* (2015) hicieron experimentos en rosa cv. Chinensis, en un área de 240 m<sup>2</sup> con cinco tratamientos y AT = 48 m<sup>2</sup>.

Con excepción del experimento de Esmeral *et al.* (2011a), de donde surgió la propuesta de diseño de SPF y que comprendía un AT de 56 m<sup>2</sup>, los demás experimentos fueron desarrollados para áreas extensas de investigación, dentro o fuera del invernadero. El SPF desarrollado permite realizar investigación en áreas muy pequeñas aumentando sustancialmente la eficiencia del proceso de investigación, así como la de los recursos invertidos para tal fin.

El seguimiento al sistema durante el periodo de cosecha dio como resultado un caudal de gotero de 120 y 60 mL para rosa y clavel, respectivamente, teniendo así una aplicación diaria de 66 L/cama de 11 m en rosa y 42 L/cama de 7 m en clavel. La duración del pulso responde a la calibración de la bomba y del sistema de control durante la cosecha, en donde el resultado final está dado por el volumen de lixiviado alcanzado, el cual estuvo entre 30 y 50 % para ambos cultivos. Por su parte, el coeficiente de uniformidad fue superior al 90 % y el coeficiente de variación inferior a 10 %, con la excepción de los SPF correspondientes a las bombas 6, 7, 8 y 10, las cuales, al ser de longitudes cortas pero diferente tipo de goteros, presentaron dispersión en los datos. Los coeficientes de uniformidad del cuartil inferior reflejan una adecuada homogeneidad en la lámina aplicada a lo largo de la cama, mostrando que la implementación del sistema hidráulico y de control responden de manera satisfactoria al diseño realizado. En la tabla 3.1 se muestran los resultados relacionados con parámetros de riego, con coeficientes de uniformidad mayores a 94 %, excepto para el SPF 6, cuyo coeficiente de uniformidad fue del 82 %, el cual es inadecuado para riego por goteo. También se observa que los coeficientes de variación fueron

➔ **Tabla 3.1** Resultados obtenidos de parámetros de riego para cada uno de los sistemas prototipo de fertirriego (SPF) en ensayos con los cultivos de rosa y clavel.

SPF	COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD (%)	COEFICIENTE DE VARIACIÓN	PORCENTAJE DE LIXIVIADOS
A. Rosa			
1	95	0,09	58
2	94	0,09	39
3	99	0,03	34
4	99	0,02	44
5	99	0,03	29
B. Clavel			
6	82	0,14	40
7	94	0,13	39
8	94	0,14	23
9	96	0,08	35
10	99	0,16	26

diferentes entre ambas especies, en razón a que en rosa se utilizaron goteros autocompensados y en clavel no. Los porcentajes de lixiviado variaron entre 30 y 60 % en rosa, y entre 23 y 40 % en clavel.

En general, el comportamiento del sistema automatizado desarrollado para los siete SPF usados se comportó en forma muy similar a los controladores individuales, y se pudo adaptar el sistema a los requerimientos o necesidades de fertirriego de cada uno de los cultivos y experimentos.

### 3.3 Conclusiones

- Los resultados de la experimentación en sustrato y en fórmulas de fertilización en los cultivos de rosa y clavel muestran el potencial del uso del SPF desarrollado en el proyecto debido a que permite un mejor manejo de la lámina de agua aplicada y evita que se mezclen fórmulas de fertirriego.
- Se desarrolló un prototipo integral de sistema de fertirriego, el cual posibilitó el manejo de múltiples tra-



**Los coeficientes de uniformidad reflejan una adecuada homogeneidad en la lámina aplicada a lo largo de la cama. La implementación del sistema hidráulico y de control responden de manera satisfactoria al diseño realizado.**



tamientos de investigación de manera simultánea en un espacio limitado y con bajos costos de implementación.

- La independencia en el manejo del SPF permite desarrollar experimentos agrícolas, ocupando menos área de la requerida por un sistema tradicional de investigación.
- Para garantizar una alta eficiencia en la uniformidad del riego es importante utilizar goteros autocompensados y antidrenantes.
- El sistema hidroneumático garantiza una presión constante en el SPF, y combinado con los goteros apropiados se pueden lograr coeficientes de uniformidad superiores al 94 %.
- El controlador de riego hace posible garantizar que el caudal aplicado por cama y los pulsos de riego sean muy estables, y, por ende, generen aplicación de agua que produzca uniformidades altas.

## Agradecimientos



**Se desarrolló un prototipo integral de sistema de fertirriego, el cual posibilitó el manejo de múltiples tratamientos de investigación de manera simultánea en un espacio limitado y con bajos costos de implementación.**

Los investigadores de los programas de pregrado de Ingeniería Agronómica e Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, agradecen a la Asociación Colombiana de Exportadores de Flores (Asocolflores), al Centro de Innovación de la Floricultura Colombiana (Ceniflores), a la Universidad de La Salle, a la Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia) y, especialmente, a la Gobernación de Cundinamarca, por la posibilidad de participar en la ejecución del proyecto “Fortalecimiento de la competitividad del sector floricultor colombiano mediante el uso de ciencia, tecnología e innovación aplicadas en Cundinamarca”. Así mismo, agradecen a las compañías Florval SAS (perteneciente a la empresa Gr. Chía) y a Brenntag Colombia S.A. por el gentil suministro del sustrato y de las soluciones fertilizantes utilizadas en el ensayo, respectivamente.



## Conflictos de interés y contribuciones de autoría

El manuscrito fue preparado y revisado de manera conjunta por los autores, quienes declaran no tener ningún conflicto de interés que comprometa la validez de los resultados aquí presentados.

## Referencias

- Arévalo-H, J.J., Vélez, J.E. y Camacho-Tamayo, J.H. 2013. Uso eficiente del agua para el cultivo de rosa cv. Freedom bajo invernadero. *Rev. Bras. Eng. Agr. Amb.* 17(8):811-817. DOI: 10.1590/s1415-43662013000800002.
- Baracaldo A., A. del P., M.C. Díaz O., V.J. Flórez R. y C.A. González-Murillo. 2017. La productividad en rosa no se afecta con la disminución en el N total. p. 76. En: I Simposio Internacional sobre Solanaceas cultivadas en el trópico y VII Congreso Colombiano de Horticultura. Sociedad Colombiana de Ciencias Hortícolas. Miranda L., D., G. Fischer, J. Blanco M. y C. Carranza G. (eds.). Cajicá, Colombia.
- Baracaldo, A. del P., M.C. Díaz, V.J. Flórez y C.A. González. 2018. Efecto de la disminución de N total y aumento de  $\text{NH}_4^+$  en la fórmula de fertirriego en el cultivo de clavel. *Rev. Colomb. Cienc. Hortic.* 12(3):658-667. DOI: 10.17584/rcch.2018v12i3.8062.
- Baracaldo, A. del P., V.J. Flórez y C.A. González. 2019. Es posible mantener estándares de productividad y calidad en clavel con menos nitrógeno en la fórmula de fertirriego. *Rev. Colomb. Cienc. Hortic.* 13(2):279-290. DOI: 10.17584/rcch.2019v13i2.8068.
- Binda, E.A., M.E. Omaña y H.E. Tacca. 2008. Lazo de control optoacoplado para fuente conmutada. *RIAI. Rev. Iberoam. Autom. Inf. Ind.* 5(1):37-50. DOI: 10.1016/s1697-7912(08)70122-5.
- Bolla, A., M. Koukourikou-petridou, D. Voyiatzis y D. Chimonidou. 2009. Physiological responses associated



- to substrate water availability of rosa 'Eurored' plants grown in soilless greenhouse conditions. *Sci. Hortic.* 121(1):80-83. DOI: 10.1016/j.scienta.2008.12.016.
- Cabrera, R.I. 2003. Nitrogen balance for two container-grown woody ornamental plants. *Sci. Hortic.* 97(3-4):297-308. DOI: 10.1016/S0304-4238(02)00151-6.
- Capraro, F., S. Tosetti y F. Vita S. 2010. Laboratorio virtual y remoto para simular, monitorizar y controlar un sistema de riego por goteo en olivos. *Rev. Iberoam. Autom. Inf. Ind. RIAI.* 7(1):73-84. DOI: 10.1016/S1697-7912(10)70010-8.
- Casas-Ortiz, N.R. 2015. Evaluación de la modificación del contenido de nitrógeno en una fórmula de fertirriego usada en el cultivo de miniclavel variedad Rony cultivado en sustrato. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/50522/>.
- Casas, N.R., M.C. Bustos, G.N. Hernández, V.J. Flórez R. y C.A. González-Murillo. 2016. Disminución de la concentración de nitrógeno en fórmula de fertirriego en la industria colombiana de flores. pp. 1-6. En: XII Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola. Bogotá.
- Domínguez-Niño, J.M., J. Oliver-Manera, J. Girona y J. Casadesús. 2020. Differential irrigation scheduling by an automated algorithm of water balance tuned by capacitance-type soil moisture sensors. *Agric. Water Manage.* 228:105880. DOI: 10.1016/j.agwat.2019.105880.
- Eiasu, B.K., J.M. Steyn y P. Soundy. 2012. Physiomorphological response of rose-scented geranium (*Pelargonium* spp.) to irrigation frequency. *S. Afr. J. Bot.* 78:96-103. DOI: 10.1016/j.sajb.2011.05.013.
- Esmeral V., Y.R., C.A. González M. y V.J. Flórez R. 2011a. Evapotranspiración en plantas de rosa cv. Charlotte en condiciones de invernadero en la sabana de Bogotá. pp. 109-126. En: Flórez, R., V. J. (ed.). *Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. 294p.

- Esmeral V., Y.R. 2011b. Análisis de la evapotranspiración real en el cultivo de rosa. Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/3858/1/820021.2010.pdf>.
- Fernández-Pacheco, D.G., M. Ferrández-Villena, J.M. Molina-Martínez y A. Ruiz-Canales. 2015. Performance indicators to assess the implementation of automation in water user associations: a case study in southeast Spain. *Agric. Water Manage.* 151:87-92. DOI: 10.1016/j.agwat.2014.11.005.
- Flórez R., V.J., R. Parra R., M. Rodríguez S. y D.E. Nieto C. 2006. Características y fundamentos del proyecto “Producción más limpia de rosa y clavel con dos técnicas de cultivo sin suelo en la Sabana de Bogotá. pp. 3-40. En: Flórez R., V.J., A. de la C. Fernández, D. Miranda L., B. Chaves C. y J.M. Guzmán P. (eds.). *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana*. Bogotá: Unibiblos. 500p.
- Gerçek, S., M. Demirkaya y D. Işık. 2017. Water pillow irrigation versus drip irrigation with regard to growth and yield of tomato grown under greenhouse conditions in a semi-arid region. *Agric. Water Manage.* 180(A):172-177. DOI: 10.1016/j.agwat.2016.11.012.
- González-Murillo, C.A., M.F. Quintero C. y V. Meneses. 2006. Determinación de algunas propiedades hidrofísicas de los sustratos utilizados en cultivos de flores en la sabana de Bogotá. pp. 427-450. En: Flórez R., V.J., A. de la C. Fernández, D. Miranda L., B. Chaves C. y J.M. Guzmán P. (eds.). *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana*. Bogotá: Unibiblos. 500p.
- Henao T., M.C. y V.J. Flórez R. 2006. Relación entre la composición química de los lixiviados y el tipo de sustrato en un sistema de producción de rosa y clavel sin suelo. pp. 265-282. En: Flórez R., V.J., A. de la C. Fernández, D. Miranda L., B. Chaves C. y J.M. Guzmán P. (eds.). *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana*. Bogotá: Unibiblos. 500p.
- Katsoulas, N., C. Kittas, G.C. Dimokas y C. Lykas. 2006. Effect of irrigation frequency on rose flower production and



- quality. Biosyst. Eng. 93(2):237-244. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2005.11.006.
- Li, X., Y. Kang, S. Wan, X. Chen y J. Xu. 2015. Effect of drip-irrigation with saline water on Chinese rose (*Rosa chinensis*) during reclamation of very heavy coastal saline soil in a field trial. Sci. Hort. 186:163-171. DOI: 10.1016/j.scienta.2015.02.024.
- López-Zuluaga, A., A.K. Álvarez-Rueda, C.A. González-Murillo y V.J. Flórez-Roncancio. 2017a. Corteza de pino: una alternativa para el sustrato tradicional en la siembra de rosa para exportación. p. 86. En: Miranda L., D., G. Fischer, J. Blanco Martínez y C. Carranza Gutiérrez (eds.). Libro de resúmenes. Simposio Internacional sobre Solanaceas cultivadas en el trópico y VII Congreso Colombiano de Horticultura. Cajicá, Colombia.
- López-Zuluaga, A., A.K. Álvarez-Rueda, C.A. González-Murillo y V.J. Flórez-Roncancio. 2017b. Corteza de pino: una opción de sustrato para el cultivo de clavel. p. 87. En: Miranda L., D., G. Fischer, J. Blanco Martínez y C. Carranza Gutiérrez (eds.). Libro de resúmenes. Simposio Internacional sobre Solanaceas cultivadas en el trópico y VII Congreso Colombiano de Horticultura. Cajicá, Colombia.
- Lorenzo, P., E. Medrano y M. García. 1993. Irrigation management in perlite. Acta Hort. 335:429-34. DOI: 10.17660/ActaHortic.1993.335.52.
- Lu, D.D.C. y Q.N. Nguyen. 2012. A photovoltaic panel emulator using a buck-boost DC/DC converter and a low cost micro-controller. Sol. Energy. 86(5):1477-1484. DOI: 10.1016/j.solener.2012.02.008.
- Melián-Navarro, A., J.M. Molina-Martínez, J.A. Rodríguez-Díaz y A. Ruiz-Canales. 2017. Performance indicators to assess the implementation of automation in golf courses located in Southeast Spain. Agric. Water Manage. 183:35-40. DOI: 10.1016/j.agwat.2016.11.017.
- Merriam, J.L. y J. Keller. 1978. Farm irrigation system evaluation: a guide for management. Logan: Utah State University. 271p.

- Mich P., A.S., R. Ganesan y P. Kumar S. 2015. PLC - HMI automation based cascaded fuzzy PID for efficient energy management and storage in real time performance of a hydro electric pumped storage power plant. *Procedia Technol.* 21:248-255. DOI: 10.1016/j.protcy.2015.10.022.
- Ooi, S.K., N. Cooley, I. Mareels, G. Dunn, K. Dassanayake y K. Saleem. 2010. Automation of on-farm irrigation: horticultural case study. *IFAC Proc. Volumes.* 43(26):256-261. DOI: 10.3182/20101206-3-JP-3009.00045.
- Osroosh, Y., R.T. Peters, C.S. Campbell y Q. Zhang. 2016. Comparison of irrigation automation algorithms for drip-irrigated apple trees. *Comput. Electron. Agric.* 128:87-99. DOI: 10.1016/j.compag.2016.08.013.
- Pérez, E.M. y J.L. Martín G. 2008. *Sistemas electrónicos digitales*. Barcelona: Marcombo. 883p.
- Pizarro C., F. 1996. *Riegos Localizados de Alta Frecuencia RLAF*. Madrid: Mundi Prensa.
- Quintero-Castellanos, M.F., C.A. González-Murillo y V.J. Flórez R. 2006. Evaluación de las características hidrofísicas de los sustratos cascarilla de arroz quemada, fibra de coco y sus mezclas. pp. 451-462. En: Flórez R., V.J., A. de la C. Fernández, D. Miranda L., B. Chaves C. y J.M. Guzmán P. (eds.). *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana*. Bogotá: Unibiblos. 500p.
- Quintero-Castellanos, M.F., C.A. González-Murillo y J.M. Guzmán P. 2011. Sustratos para cultivos hortícolas y flores de corte. pp. 79-108. En: Flórez R., V.J. (ed.). *Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. 294p.
- Quintero C., M.F., J.M. Guzmán P. y J.L. Valenzuela. 2012. Evaluación de sustratos alternativos para el cultivo de miniclavell (*Dianthus caryophyllus* L.). *Rev. Colomb. Cienc. Hortic.* 6(1):76-87. DOI: 10.17584/rcch.2012v6i1.1281.
- Quintero C., M.F., M. Guzmán P., C.A. González M., J.L. Valenzuela, J.M. Sánchez y P.D. Sánchez. 2017. Consideraciones sobre los cultivos sin suelo de clavel. pp. 13-34. En: Flórez R., V.J. (ed.). *Consideraciones sobre produc-*



- ción, manejo y poscosecha de flores de corte con énfasis en rosa y clavel. (e-book). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. 210p.
- Ramírez, F.D. 2009. Cultivo de frutales. Bogotá: Grupo Latino Ltda.
- Schugurensky, C. y F. Capraro. 2006. Control automático de riego agrícola con sensores capacitivos de humedad de suelo. Aplicaciones en vid y olivo. Instituto de Automática (INAUT). Universidad Nacional de San Juan. Disponible en: [http://www.fi.unsj.edu.ar/departamentos/DptoCivil/gcuencas/tercersemi/ACCA%2018\\_45.pdf](http://www.fi.unsj.edu.ar/departamentos/DptoCivil/gcuencas/tercersemi/ACCA%2018_45.pdf); consulta: febrero de 2020.
- Spence, J., D. Buttsworth, B.K. McCabe, C. Baillie, D.L. Antille y B. Carter. 2018. Investigation into thin layer drying rates and equilibrium moisture content of abattoir paunch waste. *Renew. Energ.* 124:95-102. DOI: 10.1016/j.renene.2017.07.082.
- Turrall, H., M. Svendsen y J.M. Faures. 2010. Investing in irrigation: reviewing the past and looking to the future. *Agric. Water Manage.* 97(4):551-560. DOI: 10.1016/j.agwat.2009.07.012.
- Ucar, Y., S. Kazaz, F. Eraslan y H. Baydar. 2017. Effects of different irrigation water and nitrogen levels on the water use, rose flower yield and oil yield of *Rosa damascena*. *Agric. Water Manage.* 182:94-102. DOI: 10.1016/j.agwat.2016.12.004.
- Valera, A., A. Soriano y M. Vallés. 2014. Plataformas de bajo coste para la realización de trabajos prácticos de mecánica y robótica. *Rev. Iberoam. Autom. Inf. Ind. RIAI.* 11(4):363-376. DOI: 10.1016/j.riai.2014.09.002.
- Villamizar, F., F. Cruz, N. Cáceres y E. Valero. 2017. Desempeño del sector floricultor. Informe. Superintendencia de sociedades: 23. Disponible en: [https://www.supersociedades.gov.co/Noticias/Documents/2016/EE-Estudio sector Flores-2016 VI 13\\_Final.pdf](https://www.supersociedades.gov.co/Noticias/Documents/2016/EE-Estudio sector Flores-2016 VI 13_Final.pdf).





# Facultad de Ciencias Agrarias

## Programa de pregrado en Ingeniería Agronómica

Especialización en Cultivos Perennes Industriales  
Especialización en Ciencia y Tecnología de Alimentos

Maestría en Ciencias Agrarias  
Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos  
Maestría en Gestión y Desarrollo Rural  
Maestría en Geomática

Doctorado en Agroecología  
Doctorado en Ciencias Agrarias  
Doctorado en Ciencia y Tecnología de Alimentos

[www.cienciasagrarias.bogota.unal.edu.co](http://www.cienciasagrarias.bogota.unal.edu.co)

[proacpre\\_fcabog@unal.edu.co](mailto:proacpre_fcabog@unal.edu.co) | [proadpos\\_fcabog@unal.edu.co](mailto:proadpos_fcabog@unal.edu.co)

 CienciasAgrariasBogUN

 cienciasagrarias\_un



# $\pi$ Facultad de Ingeniería

## Programa de pregrado en Ingeniería Agrícola

E-mail: [coocuric\\_fibog@unal.edu.co](mailto:coocuric_fibog@unal.edu.co)

Conoce más en: <http://bit.ly/IngAgricolaUN>


## Maestría en Ingeniería - Ingeniería de Biosistemas

E-mail: [coocupiag\\_fibog@unal.edu.co](mailto:coocupiag_fibog@unal.edu.co)

Conoce más en: <http://bit.ly/MaesBiosistemas>

[www.ingenieria.bogota.unal.edu.co/es/](http://www.ingenieria.bogota.unal.edu.co/es/)

 [unal.ing.bog](http://unal.ing.bog)

 IngenieriaUNBog



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

CONTENIDO





# 4

## CAPÍTULO



# Optimización en el uso del nitrógeno en la fórmula de fertirriego en clavel\*

Adriana del Pilar Baracaldo Argüello<sup>1</sup>, Manfred Camilo Díaz Ortiz<sup>2</sup>  
y Víctor Julio Flórez Roncancio<sup>3</sup>

## RESUMEN

**El nitrógeno es el fertilizante más usado** en la agricultura, y contamina aguas superficiales y subterráneas a través de su lixiviación. Una disminución en la concentración del nitrógeno total y cambios en la relación amonio:nitrato pueden proveer información acerca de una mejor utilización de este nutriente. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la disminución del nitrógeno total y el aumento del porcentaje de  $\text{N-NH}_4^+$  sobre variables de nutrición mineral, balance del uso de nitrógeno, productividad y calidad. Para lograrlo, en el Centro Agropecuario Marengo de la Universidad Nacional de Colombia se evaluaron dos concentraciones de nitrógeno total (200-140  $\text{mg L}^{-1}$  en fase vegetativa y 160-112  $\text{mg L}^{-1}$  en fase reproductiva) con tres relaciones de  $\text{N-NH}_4^+:\text{N-NO}_3^-$  (5:95, 15:85 y 25:75) en plantas de clavel estándar cv. Don Pedro sembradas en sustrato. Las variables evaluadas fueron los contenidos elementales en tejido vegetal, el pH, la concentración de nitrato en el lixiviado, la eficiencia del uso del nitrógeno (EUN), tasas e índices de crecimiento, productividad y

125

\* Para citar este capítulo: Baracaldo A., A. del P., M.C. Díaz O. y V.J. Flórez R. 2021. Optimización en el uso del nitrógeno en la fórmula de fertirriego en clavel. En: Flórez R., V.J. (Ed.). Productos relevantes del proyecto Fortalecimiento de la competitividad del sector floricultor colombiano mediante el uso de ciencia, tecnología e innovación aplicadas en Cundinamarca. Bogotá: Ediciones Unisalle, Ceniflores. pp. 124-163.

Este capítulo de libro se formuló con base en las publicaciones Baracaldo, A. del P., M.C. Díaz, V.J. Flórez y C.A. González. 2018. Efecto de la disminución de N total y aumento de  $\text{NH}_4^+$  en la fórmula de fertirriego en el cultivo de clavel. Rev. Colomb. Cienc. Hortic. 12(3):658-667. doi: 10.17584/rcch.2018v12i3.8062, y Baracaldo, A. del P., V.J. Flórez y C.A. González. 2019. Es posible mantener estándares de productividad y calidad en clavel con menos nitrógeno en la fórmula de fertirriego. Rev. Colomb. Cienc. Hortic. 13(2):279-290. doi: 10.17584/rcch.2019v13i2.8068; con autorización de la Revista Colombiana de Ciencias Horticolas, según oficio No. RCCH 018-20.

1. Ingeniera agrónoma, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Correo electrónico: adbaracaldoa@unal.edu.co - ORCID: 0000-0001-7947-3510.

2. Ingeniero agrónomo, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Correo electrónico: mediazoo@unal.edu.co - ORCID: 0000-0002-1767-3039.

3. Ingeniero agrónomo, Universidad Federal de Rio Grande del Sur (UFRRS), Doctor en Ciencias, Universidad Estatal de Campinas (UNICAMP), Profesor asociado, Departamento de Agronomía, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Correo electrónico: vjflorezr@unal.edu.co - ORCID: 0000-0002-3081-2400.



calidad. Se observaron mayores concentraciones de Zn y Cu en el tejido vegetal con la disminución de N total; así mismo, se obtuvieron incrementos de N y Zn y disminución de Mg con el incremento  $\text{NH}_4^+$ , que, a su vez, redujo el pH en el sustrato. La disminución de N total no afectó significativamente el contenido de N en el tejido de la planta, pero sí el contenido de  $\text{NO}_3^-$  y N total en el lixiviado. En ambas fórmulas de fertirriego se obtuvieron productividades y calidades similares, y en aquella fórmula con menos N total mejor EUN, mitigando el impacto negativo de este nutriente en el medio ambiente. De igual manera, el componente amoniacal desempeñó un papel preponderante: el número de tallos florales por planta disminuiría en la medida en que se aumenta el componente amoniacal, de manera similar a lo observado con el porcentaje de tallos florales en el grado de calidad Select.

**Palabras clave:** *cultivo sin suelo, Dianthus caryophyllus L., flores de corte, nutrición mineral, relación amonio:nitrato, tasas e índices de crecimiento.*

126

## ABSTRACT

**Nitrogen is the most used fertilizer in agriculture** and through its leaching it contributes to the contamination of surface and underground waters. A decrease in the concentration of total nitrogen and changes in the ammonium: nitrate ratio can provide information about a better use of this nutrient. The aim of this study was to evaluate the effect of the total nitrogen decrease while increasing the  $\text{N-NH}_4^+$  percentage on variables of mineral nutrition, balance of nitrogen use, productivity and quality. The research was carried out at the Marengo Agricultural Center belonging to the Universidad Nacional de Colombia. Two concentrations of total nitrogen ( $200\text{-}140\text{ mg L}^{-1}$  in vegetative phase and  $160\text{-}112\text{ mg L}^{-1}$  in productive phase) with three ratios of  $\text{N-NH}_4^+:\text{N-NO}_3^-$  (5:95, 15:85 and 25:75) were evaluated in standard carnation cv. Don Pedro grown on substrate. The variables elemental contents in plant tissue, pH, nitrate concentration in the leachate, nitrogen use efficiency (NUE), rates and indexes of growth, productivity and quality were measured.



Higher concentrations of Zn and Cu were observed in the plant tissue with the decrease in the total N; likewise, increases of N and Zn and a decrease of Mg were obtained with the increase in  $\text{NH}_4^+$ , which in turn decreased the pH in the substrate. The decrease in the total N did not significantly affect the content of N in the plant tissue, but did significantly affect the content of  $\text{NO}_3^-$  and total N in the leachate. In both fertigation formulas similar productivities and qualities were obtained and in that formula with less total N better NUE, mitigating the negative impact of this nutrient on the environment. Likewise, the ammoniacal component plays a preponderant role: the number of flowering stems per plant would decrease as the ammoniacal component is increased, like that observed with the percentage of floral stems in Select quality grade.

**Keywords:** *soilless system culture, Dianthus caryophyllus L., cut flowers, mineral nutrition, ammonium:nitrate ratio, growth rates and indexes.*

127



En este estudio se evaluó el efecto de la disminución del N total y el aumento del porcentaje de  $\text{N-NH}_4^+$  sobre algunas variables de la nutrición mineral, el balance del uso de nitrógeno, la productividad y la calidad.



# Introducción

Aunque la agricultura requiere del uso intensivo de fertilizantes nitrogenados: nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) o urea ( $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ ), su aplicación a base de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+$  genera problemas ambientales como eutrofización de reservorios de agua, contaminación de acuíferos y polución atmosférica. Dicha problemática es un asunto serio de reconocimiento mundial, de preocupación pública y económica (Esteban *et al.*, 2016; Cameron *et al.*, 2013). Para el 2020 se estima un consumo de aproximadamente 201,7 millones de toneladas de fertilizantes a base de NPK, de los cuales el 58,9 % corresponde a nitrogenados (FAO, 2017). La aplicación de nitrógeno (N) en el mundo aumentó más de ocho veces desde 1961 (Kant, 2018). En Colombia, el consumo de estos insumos agrícolas ha aumentado de forma notable desde el 2000, a pesar de no haber un aumento significativo en la superficie de uso agrícola en el país (ICA y MADR, 2015). En las condiciones locales, por lo general, la fertilización en sistemas de cultivo sin suelo se basa en prácticas empíricas, lo que, en general, lleva al productor a sobreestimar las necesidades de las plantas y a aplicar cantidades excesivas, con el consecuente desperdicio de nutrientes y dinero, así como el riesgo de contaminación de cursos de agua y aguas profundas.

En la mayoría de las cerca de 1120 hectáreas sembradas con clavel en el país (Cámara de Comercio de Bogotá, 2015) se ha venido implementado el sistema de cultivo en sustrato, con un consumo de 150 a 220  $\text{mg L}^{-1}$  de N en la fórmula de fertirriego, en 1  $\text{m}^3$  de agua por cama por semana. El sistema genera una solución salina en el lixiviado, que corresponde entre 20 y 50 % del volumen total aplicado por cama (Lorenzo *et al.*, 1993). Por lo tanto, este sistema genera impactos ambientales negativos derivados del alto consumo de agua y del vertimiento de sales fertilizantes al medio ambiente. Este impacto ambiental potencial en el agroecosistema de la Sabana de Bogotá aún no ha sido dimensionado.

Las reacciones de intercambio catiónico en el suelo mediante atracción electrostática retienen los iones de amonio que en su condición de catión se adsorbe en los sitios de inter-



En un sistema de cultivo en sustrato para clavel se reportaron valores entre 70 y 510  $\text{mg L}^{-1}$  de  $\text{NO}_3^-$  en el lixiviado, por encima del máximo permitido por la OMS (50  $\text{mg L}^{-1}$ ) y por la Agencia Norteamérica EPA (10  $\text{mg L}^{-1}$ ).

cambio de cationes con la carga negativa de la superficie de las arcillas y de la materia orgánica. Este mecanismo ayuda a almacenar amonio en el suelo y también reduce su concentración en la solución del suelo. Esto protege a los iones  $\text{NH}_4^+$  de la lixiviación y permite que sea absorbido por las plantas o inmovilizado en la materia orgánica del suelo. El anión nitrato no es retenido por el complejo de intercambio catiónico del suelo y, por ende, se lixivia fácilmente del suelo si no es absorbido por las plantas, inmovilizado o desnitrificado. La pérdida de  $\text{NO}_3^-$  por lixiviación representa una amenaza para el medio ambiente y para la salud humana (Cameron *et al.*, 2013). Vélez (2012) en un sistema de cultivo en sustrato para clavel estándar cv. Delphi sometido a tres porcentajes de recirculación de drenajes reportó valores entre 70 y 510  $\text{mg L}^{-1}$  de  $\text{NO}_3^-$  en el lixiviado, por encima del máximo permitido por la Organización Mundial de la Salud (50  $\text{mg L}^{-1}$ ) (WHO, 2011) y por la Agencia Norteamérica para la Protección del Medio Ambiente (10  $\text{mg L}^{-1}$ ) (EPA, 2009). Y, aunque en el tratamiento con menos nitrógeno en la fórmula de fertirriego utilizada en miniclavel cv. Rony, Casas (2015) reportó una reducción en la concentración de nitrato en el lixiviado, esta aún fue superior a 100  $\text{mg L}^{-1}$ , por encima del máximo permitido para aguas superficiales que se destinaran a tratamiento y luego a consumo humano, según el Decreto 1594 de 1984 (concentración máxima de 10  $\text{mg L}^{-1}$ ) (OAB, 2019).

129

## Nutrición con nitrógeno

El nitrógeno es uno de los nutrientes minerales clave para las plantas, y su disponibilidad tiene el mayor impacto en su crecimiento y desarrollo. Frecuentemente, las fuentes de N son limitantes, por lo que las plantas han desarrollado diversas estrategias para modular su capacidad de absorción radicular y compensar la disponibilidad espacial y temporal de N en el suelo. Las principales fuentes de N para las plantas terrestres en los suelos de regiones templadas en orden decreciente de abundancia son nitrato, amonio y aminoácidos (Nacry *et al.*, 2013). El contenido de N necesario para el



crecimiento óptimo varía entre 1 y 5 % de la masa seca de las plantas puesto que constituye proteínas, ácidos nucleicos, pigmentos, coenzimas, fitohormonas y metabolitos secundarios (Hawkesford *et al.*, 2012). La importancia del nitrógeno en el desarrollo de las plantas, su esencialidad, los compuestos de los que hace parte (Kiba *et al.*, 2011), su influencia en procesos metabólicos (Jin *et al.*, 2015), en la eficiencia en el uso del agua (Ucar *et al.*, 2017), y los síntomas de deficiencia y toxicidad (Gárate y Bonilla, 2013) están ampliamente descritos en la literatura, de la misma forma que los procesos metabólicos de asimilación del nitrógeno (Maldonado *et al.*, 2013), la influencia de factores ambientales y de la propia especie (Cabrera, 2006), su efecto en la acumulación de metales pesados (Yang *et al.*, 2020), su movilidad, almacenamiento, los complejos enzimáticos, organelos y fuentes energéticas involucradas en la reducción a amonio (Barker y Bryson, 2007; Kant, 2018).

La influencia del N es significativa en la asimilación del carbono en los órganos fuente y en la translocación y la utilización de fotoasimilados en los órganos vertedero, lo que determina la tasa de crecimiento y la productividad de las plantas de cultivo. Es esencial para la fotosíntesis en plantas superiores. Un contenido adecuado de N en hojas mejora el uso eficiente de la radiación (RUE) y, en consecuencia, el rendimiento de los cultivos (Fageria, 2016). Así mismo, con aumentos de la tasa de aplicación hasta 150 kg ha<sup>-1</sup> de N en maíz, Jin *et al.* (2015) muestran incrementos en los valores de masa seca foliar, máximo rendimiento cuántico del fotosistema II, asimilación fotosintética del carbono, concentración de nitrógeno foliar, concentración foliar de azúcar y de la relación azúcar:nitrógeno.

Las principales fuentes de N absorbidas por las raíces de las plantas superiores son NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, y la disponibilidad de estas fuentes en el suelo varía sustancialmente en tiempo y espacio, en función de sus propiedades tales como textura, pH, humedad y actividad microbiana. Por consiguiente, las plantas han desarrollado mecanismos para modular la eficiencia en la absorción de N en respuesta a la disponibilidad y a la forma del N presente en la solución del suelo,

así como a la demanda de N por parte de la planta durante su ciclo de vida (Hawkesford *et al.*, 2012). La cinética de la absorción (o influjo) radicular de  $\text{NO}_3^-$  o  $\text{NH}_4^+$  en función de la concentración externa generalmente muestra un patrón bifásico. En el rango de baja concentración, los sistemas de transporte de alta afinidad (HATS) pueden encontrar iones en el suelo a concentraciones tan bajas como  $1 \mu\text{M}$ . Ambos HATS de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+$  son saturables. En el rango de alta concentración (típicamente  $> 0,5 - 1 \text{ mM}$ ), la actividad de los sistemas de transporte de baja afinidad (LATS) se hace evidente, sobreponiéndose a los HATS. Al contrario de los HATS, la absorción de  $\text{NO}_3^-$  o  $\text{NH}_4^+$  mediada por LATS no es saturable, y por lo general muestra un aumento lineal con el incremento de la concentración externa; esta condición a menudo se ha considerado como la evidencia de que HATS y LATS no involucran el mismo transportador proteico. También se plantea la hipótesis de que el HATS para  $\text{NO}_3^-$  comprende dos componentes diferentes: uno constitutivo (CHATS), presente y activo incluso en ausencia de  $\text{NO}_3^-$ , y otro inducible (iHATS), que solo se expresa o activa después de pretratamiento con  $\text{NO}_3^-$  (Nacry *et al.*, 2013). En las plantas, la absorción radical del  $\text{NH}_4^+$  depende de transportadores que son proteínas integrales de membrana de la familia AMT1. Estas proteínas han sido descritas como un transportador unidireccional a lo largo del gradiente electroquímico o como cotransporte de  $\text{NH}_3/\text{H}^+$  (Kraiser *et al.*, 2011).

También en las plantas, los transportadores de nitrato están representados por dos familias principales de genes: la familia NRT1 PTR (transportador de nitrato, transportador de péptidos) (NPF) y la familia NRT2, que pertenece a una superfamilia de facilitadores principales (MFS). Otras dos familias de transportadores están involucradas en el transporte intracelular de nitrato: la familia CLC (canal de cloruro) y la familia SLAC/SLAH (canal de aniones de activación lenta). Los miembros de las familias NPF y NRT2 están ubicados en diferentes órganos y tejidos, y participan en la absorción de nitrato del suelo o en la distribución en las diferentes partes de la planta (Hirel y Krapp, 2020). Comprender estos mecanismos de absorción y transporte de N por parte de las plantas es el primer



Comprender los mecanismos de absorción y transporte de N en las plantas es fundamental para desarrollar soluciones biotecnológicas efectivas y sostenibles para mejorar el uso de N en entornos naturales o agrícolas.





paso para desarrollar soluciones biotecnológicas efectivas y sostenibles para mejorar el uso de N por las plantas en entornos naturales o agrícolas.

En este sentido, uno de los objetivos más importantes para el desarrollo de una agricultura sostenible es aumentar el rendimiento y la calidad de los cultivos con menos fertilizantes nitrogenados para mejorar la eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN) (Good *et al.*, 2004; Lupini *et al.*, 2017). Al respecto, Kumar *et al.* (2016) mostraron que con 0, 50, 100, 150 y 200 mg L<sup>-1</sup> de N en plantas de clavel cv. Red Corso, los valores de las variables evaluadas (número de botones florales por planta, número de flores por planta, tamaño de la flor, peso de la flor, longitud del tallo y duración de la flor) aumentaron significativamente hasta 150 mg L<sup>-1</sup>.

## La relación $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ y su efecto en las plantas

La asimilación de  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_3^-$  tiene diferentes costos potenciales con respecto a energía y agua, con  $\text{NH}_4^+$  como la fuente menos costosa, porque el  $\text{NO}_3^-$  debe ser reducido a  $\text{NH}_4^+$  para ser asimilado por la planta, con consumo equivalente de 8 a 12 moles de ATP por cada mol de  $\text{NO}_3^-$  reducido. Se requieren cinco ATP por cada mol  $\text{NH}_4^+$  asimilado (Hawkesford *et al.*, 2012). En varios cultivos, la combinación de ambas formas ( $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_3^-$ ) comúnmente resulta en mejor crecimiento en comparación con el uso de solo una de las formas (Vojtíšková *et al.*, 2004; Li *et al.*, 2007). Para una dosis de N y un régimen de riego determinados, la relación en mención, según Bar-Yosef (2008), afecta varios factores de la solución del suelo y del cultivo: (i) eficiencia en la absorción de nitrógeno; (ii) disminución de tasas de absorción de  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  y  $\text{K}^+$  debido a la competencia con la absorción de  $\text{NH}_4^+$ ; (iii) el suministro de  $\text{NH}_4^+$  disminuye el pH de la solución mientras que el de  $\text{NO}_3^-$  tiende a aumentarlo, y (iv) la absorción excesiva de  $\text{NH}_4^+$ , particularmente a temperaturas mayores a 28 °C en la zona radicular, es perjudicial para el desarrollo de las propias raíces. Con base en lo anterior, la mejor relación por aplicar varía con factores como la etapa fenológica (Cui *et al.*,

2017) y la temperatura (Liu *et al.*, 2017). Un desbalance en la relación  $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$  puede afectar la solubilidad y disponibilidad de otros nutrientes esenciales para las plantas, debido a cambios en el pH del entorno radical (Helali *et al.*, 2010). La toxicidad (sensibilidad) y tolerancia a  $\text{NH}_4^+$  en plantas desde la hipótesis clásica hasta la más reciente es ampliamente abordada por Esteban *et al.* (2016), para quienes los cultivos de papa o remolacha azucarera en general son más sensibles a  $\text{NH}_4^+$  que sus respectivos parientes silvestres; sin embargo, arroz, arándanos y cebolla se han adaptado a altas concentraciones y raramente alcanzan umbral de toxicidad por  $\text{NH}_4^+$ . Esta relación también está asociada con la susceptibilidad o la tolerancia a plagas y enfermedades, según Žanić *et al.* (2011), quienes argumentan que con mayor concentración de N y alta proporción de  $\text{NO}_3^-$  se aumenta la severidad de la infestación con mosca blanca en el estrato medio de plantas de tomate. De igual manera, dependiendo de la especie, dicha relación afecta indicadores del desarrollo y la nutrición mineral de las plantas. De acuerdo con González *et al.* (2009), la relación  $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$  0:100 en cebollín favoreció el área foliar y la producción de biomasa; la 20:80 en albahaca incrementó el rendimiento, y en eneldo no se observaron diferencias en altura de planta, área foliar y biomasa total en las relaciones estudiadas. Mientras que en tomate la relación  $\text{NO}_3^-:\text{NH}_4^+$  70:30 disminuyó la concentración de Ca foliar y aumentó la de P, también redujo algunos indicadores de crecimiento sin afectar la productividad, viabilizando el uso de la fuente amoniacal (Parra *et al.*, 2012). En lechuga se absorbe preferencialmente más  $\text{NH}_4^+$  que  $\text{NO}_3^-$ , e incrementos de hasta 30 % del N total estimulan el crecimiento, probablemente como consecuencia del aumento en la absorción de P, resultante de un mejor control del pH en la zona radical. Los contenidos foliares de P, Mn, Zn y Cu aumentaron en función del incremento de la fuente amoniacal (Savvas *et al.*, 2006).

Al utilizar las relaciones  $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$  de 0,25, 0,37 y 0,51 en una solución nutritiva para anturio, Dufour y Guérin (2005) encontraron que con el aumento de dicha relación hasta 0,37 del N total se mejoraron tanto el crecimiento como el desarrollo y el rendimiento de las plantas. Khalaj *et al.* (2017)



La asimilación de  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_3^-$  tiene diferentes costos potenciales con respecto a energía y agua, con  $\text{NH}_4^+$  como la fuente menos costosa, porque el  $\text{NO}_3^-$  debe ser reducido a  $\text{NH}_4^+$  para ser asimilado por la planta.





La disminución en la concentración del N total buscando optimizar la fórmula de fertirriego y el aumento en la relación  $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$  pueden proveer información acerca de una mejor utilización y optimización del uso del N.

evaluaron el efecto de relaciones  $\text{NO}_3^-:\text{NH}_4^+$  (100:0, 80:20, 60:40, 40:60) en la solución de fertirriego utilizada en gerbera cv. Stanza y Double Dutch. Con la relación 80:20 se obtuvieron los mayores valores en las variables evaluadas (número de hojas por planta, número de flores, diámetro del tallo y de la flor, masa fresca y seca de la raíz y de la parte aérea y la vida en florero); con la disminución de la relación a 40:60 se redujo en forma significativa el crecimiento vegetal y la biomasa. El aumento en la concentración de amonio incrementa los contenidos de carotenoides y clorofilas, así como la actividad catalasa y peroxidasa en las células. Para el cultivo hidropónico de fresa, Tabatabaei *et al.* (2006) encontraron que las altas relaciones de  $\text{NH}_4^+$  y de  $\text{NO}_3^-$  en la solución de fertirriego siempre redujeron el rendimiento, y con la relación  $25\text{NH}_4^+:75\text{NO}_3^-$  obtuvieron incrementos en el rendimiento de 38 % y 84 % en los cv. Camarosa y Selva, respectivamente. El mayor rendimiento en esta relación hace referencia a incrementos en el tamaño del fruto: longitud y masa fresca de los frutos. Sin embargo, el incremento de 0 a 75 % en la relación de  $\text{NH}_4^+$  redujo de manera significativa la concentración de Ca y la vida en poscosecha de ambos cultivares. Al parecer, mayores área foliar y tasa de fotosíntesis en la relación 25:75 de N serían la razón para los incrementos en productividad y crecimiento de las plantas. Para Roosta (2014), los efectos adversos de la alcalinidad sobre los valores de SPAD y el máximo rendimiento cuántico del PSII ( $F_v/F_m$ ) fueron aliviados con incrementos en la proporción de  $\text{NH}_4^+$  en la solución nutriente, con lo cual aumentaron el número de frutos y el rendimiento en fresa cv. Camarosa. Entre los tratamientos estudiados por Abasi *et al.* (2016) en el cultivo hidropónico de tulipán cv. Apricot Parrot y Daytona, con la relación de 0,38 de  $\text{NH}_4^+ / \text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$  en la solución nutritiva encontraron los valores máximos en las concentraciones de Ca y Mg, la longevidad floral, la masa seca y los valores óptimos de N, P, K. Por lo aquí expuesto, se necesitan estudios específicos para cada especie con la finalidad de encontrar la mejor relación  $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$  en función de la calidad y la productividad requeridas.

Entre las estrategias para mitigar el impacto del nitrógeno como contaminante están el reducir el aporte de nitrógeno

total e incrementar el porcentaje de amonio. Por lo tanto, la disminución en la concentración del N total buscando optimizar la fórmula de fertirriego y el aumento en la relación  $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$  pueden proveer información acerca de una mejor utilización y optimización del uso del N, y de esta forma afectar los contenidos de sales en el lixiviado que genera este sistema de cultivo, a fin de mitigar el impacto ambiental.

El objetivo del presente ensayo fue estudiar el efecto de la disminución del N total y el aumento de la relación  $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$  en la solución de fertirriego utilizada sobre la eficiencia en el uso del nitrógeno, el contenido de elementos en el tejido vegetal, el sustrato y el lixiviado, así como sobre indicadores del crecimiento, la productividad y la calidad en el cultivo de clavel estándar (*Dianthus caryophyllus* L.) cv. Don Pedro.

## 4.1 Materiales y métodos

La investigación se llevó a cabo en el Centro Agropecuario Marengo (CAM) de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, ubicado en el municipio de Mosquera (Cundinamarca), a 4° 42' N y 74° 12' W, a 2540 msnm, con temperatura promedio de 12,4 °C, humedad relativa entre 76 y 89 % y precipitación promedio anual de 1124 mm (Ordóñez y Bolívar, 2014). Durante el estudio los promedios de temperatura y humedad relativa dentro del invernadero fueron de 17,5 °C y 76 %, respectivamente.

Para el ensayo se utilizó un invernadero tradicional de estructura metálica tipo flexon (Acuña y Ortiz, 2004), con ventilación lateral y cenital pasivas, en el cual se acondicionaron dos naves de 9 × 70 m (630 m<sup>2</sup>) cada una. Se construyeron seis camas en madera (7 × 0,7 m), levantadas a 0,4 m del suelo, a doble contenedor de 0,25 m de ancho y 0,2 m de profundidad cada uno, y al final de cada cama se ubicó un tanque recolector de lixiviado. Se sembraron esquejes con raíz de clavel estándar (*Dianthus caryophyllus* L.) cv. Don Pedro, a una densidad de 15,5 plantas por m<sup>2</sup> invernadero, en un sistema abierto de cultivo en sustrato. El sustrato utilizado

consistió en una mezcla de 50 % de cascarilla de arroz cruda + 15 % cascarilla de arroz tostada + 25 % de cascarilla de arroz tostada reutilizada + 10 % compost, obtenido de los residuos del cultivo de rosa y clavel (v/v/v/v). La CE y el pH iniciales de esta mezcla estuvieron entre 0,5 y 1,0 dS m<sup>-1</sup> y entre 6,8 y 7,0, respectivamente. El manejo agronómico del cultivo se hizo conforme a lo descrito en Flórez *et al.* (2006a).

Se establecieron seis tratamientos correspondientes a modificaciones en el contenido de N de la fórmula convencional aplicada comercialmente en el cultivo de clavel (200 - 160 mg L<sup>-1</sup> de N total para las fases vegetativa y productiva del cultivo, respectivamente, manteniendo una relación NH<sub>4</sub><sup>+</sup>:NO<sub>3</sub><sup>-</sup> de 15:85). En esta fórmula, el N total se redujo en 30 %, y la relación NH<sub>4</sub><sup>+</sup>:NO<sub>3</sub><sup>-</sup> se disminuyó o aumentó en 10 % (tabla 4.1). En las soluciones de fertirriego, la CE se mantuvo entre 1,5 y 2,5, y el pH entre 5,5 y 6,0; las concentraciones de los demás elementos (mg L<sup>-1</sup>) en las fases vegetativa y reproductiva fueron: P, 30; K, 150; Ca, 120; Mg, 40; Fe, 3; Cu, 1; Zn, 0,5; B, 1; Mo, 0,1; para S, esta osciló entre 2 y 116 mg L<sup>-1</sup> en razón a que se utilizó para el balance estequiométrico de la fórmula en el ajuste de NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. Para el cálculo de las soluciones nutritivas se tuvo en cuenta el aporte del agua (CE = 0,6 y pH = 7,0) y de Mn por parte del sustrato a base de cascarilla de arroz tostada (Florián-Martínez y Roca, 2011).

➔ **Tabla 4.1** Concentraciones y relaciones de nitrógeno evaluadas en la fórmula de fertirriego utilizada en el cultivo de clavel cv. Don Pedro sembrado en sustrato.

TRATAMIENTOS		NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> :NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (%)	FASE VEGETATIVA			FASE PRODUCTIVA		
			NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	N TOTAL	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	N TOTAL
			(mg L <sup>-1</sup> )					
5 % N-NH <sub>4</sub>		5:95	10	190	200	8	152	160
15 % N-NH <sub>4</sub>		15:85	30	170		24	136	
25 % N-NH <sub>4</sub>		25:75	50	150		40	120	
30 % menos N	5 % N-NH <sub>4</sub>	5:95	7	133	140	5,6	106,4	112
	15 % N-NH <sub>4</sub>	15:85	21	119		16,8	95,2	
	25 % N-NH <sub>4</sub>	25:75	35	105		28	84	

En las semanas 16, 21 y 26 después de siembra (SDS) durante el ciclo de producción se realizaron tres muestreos de carácter destructivo de planta completa para los respectivos análisis. En estas mismas semanas se recogieron tres muestras de sustrato y una de lixiviado por tratamiento, tomando cerca de 1 kg de sustrato por unidad experimental y de 1 L de lixiviado en el canal de la cama de cada tratamiento. Las muestras fueron transportadas al laboratorio en condiciones refrigeradas. En el tejido vegetal y en el sustrato se determinaron los contenidos de N, P, K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn, Zn y B de acuerdo con Carrillo *et al.* (1994), así como el pH del sustrato. En el lixiviado se determinó la concentración de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{PO}_4$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$  y el pH y la CE según Rice *et al.* (1967). Los análisis se llevaron a cabo en el Laboratorio de Aguas y Suelos de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia. Para el cálculo del balance de nitrógeno se tuvo en cuenta el contenido de N en el fertirriego, en el volumen total del lixiviado y en la masa seca del último muestreo.

Para el análisis de crecimiento en las 16, 21 y 26 SDS del ciclo de producción se midieron las variables área foliar y masa seca de la raíz, y de la parte aérea, discriminada en masa seca de tallos, hojas y botones florales. El área foliar ( $\text{cm}^2$ ) se determinó con un medidor de marca LI-COR, modelo LI-3100. Con base en estos datos, y de acuerdo con Flórez *et al.* (2006b), se calculó la tasa relativa de crecimiento (TRC), el índice de área foliar (IAF), el área foliar específica (AFE) y la relación de masa foliar (RMF). A partir de la 10 SDS y con frecuencia quincenal se seleccionaron al azar seis plantas por tratamiento para las medidas de crecimiento continuo. Se contó el número de tallos por planta, y en el tallo medio de cada una de ellas se midió la longitud y el diámetro del tallo, el número de hojas, así como la longitud y el diámetro del botón floral.

La productividad y la calidad de los tallos florales de clavel se registraron para cada uno de los tratamientos. La productividad es expresada en número de tallos florales producidos por  $\text{m}^2$  de área de invernadero, mientras que la calidad, en porcentajes de los tallos según los parámetros de los grados Select, Fancy, estándar y nacional. Esta última fue determinada,



**El contenido de N se redujo 30 % en la fórmula (200 - 160  $\text{mg L}^{-1}$  de N total para las fases vegetativa y productiva, respectivamente, con una relación  $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$  de 15:85). Esta relación se disminuyó o aumentó en 10 %.**





Teniendo en cuenta la concentración de N total en la fórmula de fertirriego, los contenidos de N, Cu y Zn en el tejido de la planta presentaron diferencias estadísticamente significativas en algunos estadios fenológicos.

entre otras características, por la longitud y fortaleza del tallo, el tamaño y punto de apertura de las flores, los defectos en atributos o parámetros de calidad y por la presencia de plagas o enfermedades, conforme son descritos en Reid y Hunter (2000) y en Escandón (2009).

La eficiencia del uso del nitrógeno (EUN) se calculó teniendo en cuenta la acumulación de masa seca y la absorción de nitrógeno según Good *et al.* (2004), de acuerdo con la siguiente fórmula:  $EUN = \text{masa seca de planta completa (g)} / \text{contenido de nitrógeno en planta completa (g)}$ .

#### 4.1.1 Análisis estadístico

Se utilizó un diseño experimental completamente aleatorizado en arreglo factorial con dos niveles de nitrógeno total y tres relaciones  $NH_4^+ : NO_3^-$  (tabla 4.1). Los seis tratamientos tuvieron tres réplicas, y la unidad experimental consistió en 2 m de cama con 46 plantas. El análisis inferencial se realizó por medio de análisis de varianza (Anova) y comparación múltiple de Tukey, con nivel de significancia  $\alpha = 0,05$ . Se verificaron normalidad y homogeneidad de varianza en los residuales por medio de las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene, respectivamente, para validar el modelo ajustado. Todos los análisis fueron realizados con el *software* estadístico SAS v. 9.1.

## 4.2 Resultados relevantes

A continuación, se analiza y se discuten los resultados significativos del contenido de nutrientes en tejido vegetal, del pH en sustrato y del contenido de  $NO_3^-$  en el lixiviado. Luego, se aborda el balance de nitrógeno del cultivo en respuesta a los tratamientos evaluados. Se presentan el comportamiento de las variables de crecimiento, de las tasas e índices de crecimiento, y la información obtenida sobre productividad y calidad. También, se analiza y se discuten los resultados del uso eficiente del nitrógeno.

## 4.2.1 Contenido de nutrientes en tejido vegetal

### 4.2.1.1 Efecto de la disminución de nitrógeno

Al abordar el análisis estadístico de los contenidos de nutrientes en el tejido de la planta entera teniendo en cuenta en la fórmula de fertirriego el factor concentración de N total, los contenidos de N, Cu y Zn presentaron diferencias estadísticamente significativas en algunos estadios fenológicos (figura 4.1). En la 21 SDS, las plantas del tratamiento con menor concentración de N (140-112 N) muestran un contenido menor de N con respecto al tratamiento con mayor concentración (200-160 N) (figura 4.1A), que contrasta con el mayor contenido de Cu encontrado en el tratamiento con menor concentración de N (figura 4.1B). Así, se visualiza una posible relación inversa N:Cu. En la primera evaluación también se constató una concentración mayor de Zn en el tratamiento 140-112 N, en comparación con el tratamiento 200-160 N (figura 4.1C).

La relación N:Cu descrita en el presente estudio fue abordada por Navarro y Navarro (2003); para Broadley *et al.* (2012), en condiciones de alto suministro de N, el contenido de Cu de las raíces se incrementa proporcionalmente a su concentración externa, aunque se inhibe de forma drástica su transporte a la parte aérea. Para Navarro y Navarro (2003), las cantidades elevadas de compuestos nitrogenados en el suelo también son un factor influyente en el movimiento del Zn en el suelo y puede provocar deficiencia de Zn a causa de la cinética de absorción propia de los dos elementos. Rehman *et al.* (2018) indican que la aplicación de N aumenta la concentración y absorción de Zn en semillas de cereales, aunque Kumar *et al.* (1985) encontraron en plantas de mijo perla un efecto sinérgico del N sobre la concentración de Zn en hojas y tallos, y antagónico en la raíz.

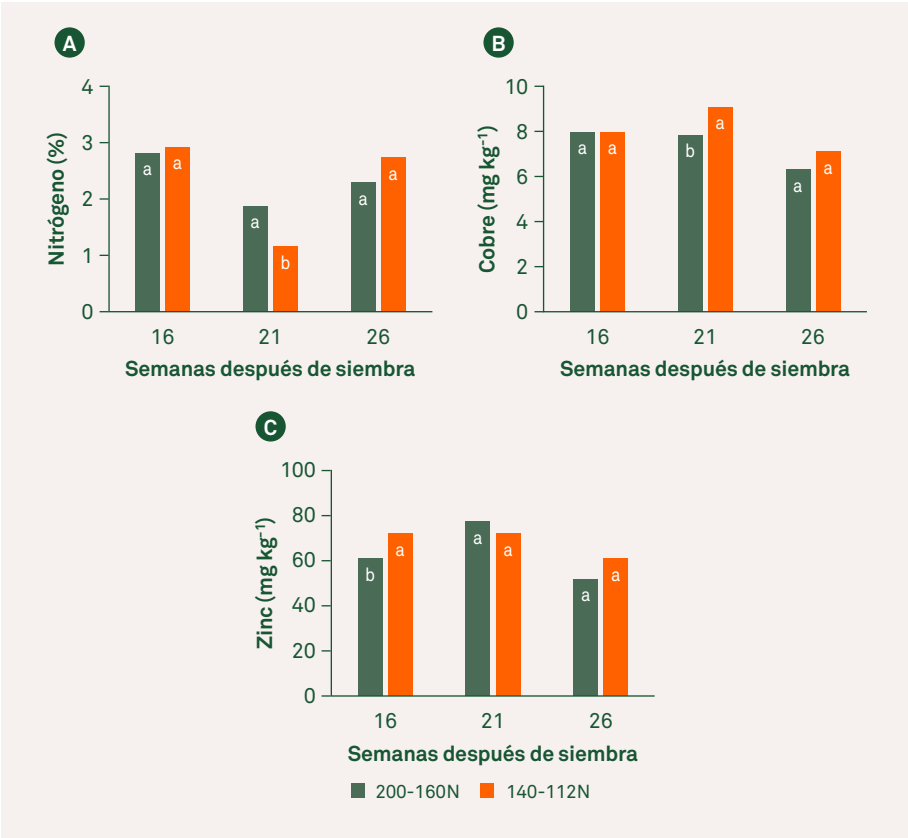
En general, Yang *et al.* (2020) expresan que la fertilización con N mejora los contenidos de Fe, Zn, Cu, Ca, Hg y otros cationes en granos, y que el incremento en el suministro de N estimula el contenido radicular de Zn, su translocación de raíz a la parte aérea y el contenido total de Zn en trigo. Las





fuentes nítricas y amoniacales también pueden aumentar la acumulación de Zn y Pb en *Populus euramericana*. Sin embargo, la aplicación de niveles óptimos de nitrógeno en un suelo contaminado con metales pesados aumentó la translocación de dichos metales de la rizosfera a las raíces, y de la raíz a la parte aérea en granos de trigo, aunque con el suministro excesivo de N estos incrementos resultaron no significativos.

**Figura 4.1** Valores promedio del contenido de N (A), Cu (B) y Zn (C) en el tejido vegetal de plantas completas de clavel cv. Don Pedro sembradas en sustrato, con disminución del N total en la fórmula de fertirriego. Promedios seguidos con letras distintas indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ( $P<0,05$ ).



FUENTE: Baracaldo et al. (2018)

#### 4.2.1.2 Efecto del aumento de nitrógeno amoniacal

En la figura 4.2 se muestran los contenidos de N, Mg y Zn, con diferencias estadísticas significativas en algunos de los estadios fenológicos evaluados, cuando en el análisis estadístico se consideró el aumento de N- $\text{NH}_4$ . En las 16 y 26 SDS, las plantas con más contenido de  $\text{NH}_4$ , 15 y 25 %, respectivamente, de manera consecuente presentaron porcentajes mayores de N en el tejido de la planta (figura 4.2A). Asimismo, en la 21 SDS, las plantas sometidas a mayor porcentaje de  $\text{NH}_4^+$  (25 %) manifestaron contenidos mayores de Zn, con respecto a los tratamientos con 5 y 15 % de  $\text{NH}_4^+$  (figura 4.2C). Este resultado es contrario a lo verificado para Mg en las 16 y 21 SDS, cuando con el menor porcentaje de  $\text{NH}_4^+$  (5 %) se observaron los mayores contenidos del ion (figura 4.2B).

Al adicionar  $\text{NH}_4^+$  en las soluciones nutritivas formuladas con  $\text{NO}_3^-$  para plantas de rosa cultivadas en hidroponía, Lorenzo *et al.* (2000) encontraron una mayor tasa de absorción de N total, P y K, con incremento en la concentración de P en las raíces. Por otra parte, Abasi *et al.* (2016) evaluaron el efecto de relaciones  $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$  en tulipán y, contrario a lo encontrado en el presente estudio, las plantas con mayor proporción de  $\text{NH}_4^+$  (0,14) presentaron concentraciones significativamente más bajas de N en los bulbos de las plantas (0,84 %); ellos afirman que las plantas fertirrigadas con  $\text{NO}_3^-$  generalmente tienen una concentración alta de N en comparación con las fertirrigadas con  $\text{NH}_4^+$ . Sin embargo, para Mengel y Kirkby (2001), las plantas fertilizadas con  $\text{NH}_4^+$  tienen una mayor concentración de N en los tejidos de la parte aérea.

A mayores concentraciones de  $\text{NH}_4^+$  en la solución nutritiva, se disminuye la absorción de cationes, como K, Ca y Mg. Según Abasi *et al.* (2016), las concentraciones de N en bulbo y de Ca, Mg y K en la parte aérea del tulipán se vieron significativamente afectadas por la fuente de N. En general, en las plantas fertilizadas con  $\text{NH}_4^+$  se observaron concentraciones más bajas de los cuatro elementos, con 0,84, 1,10, 0,80 y 0,53 %, respectivamente.

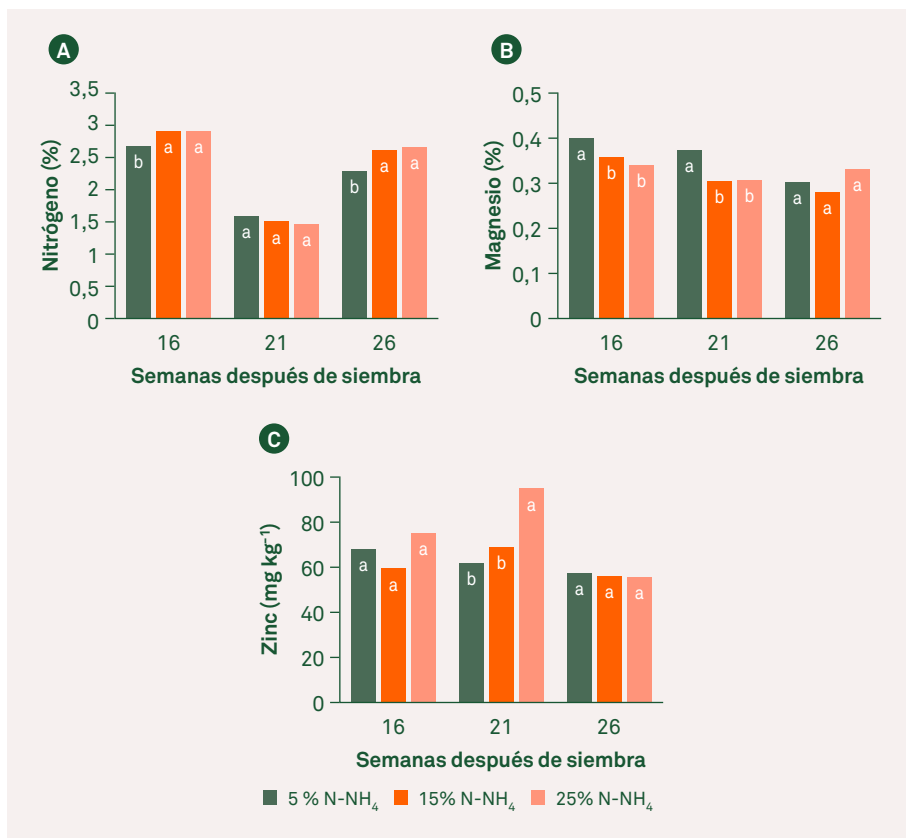
En suelos neutros o alcalinos la acidificación de la rizosfera con la aplicación de amonio puede mejorar la movilización



Cuando en el análisis estadístico se consideró el aumento de N- $\text{NH}_4$ , se muestran diferencias estadísticas significativas en los contenidos de N, Mg y Zn, en algunos de los estadios fenológicos evaluados.



➔ **Figura 4.2** Valores promedio del contenido de N (A), Mg (B) y Zn (C) en el tejido vegetal de plantas completas de clavel cv. Don Pedro sembradas en sustrato, con incrementos en el componente amoniacal de la fertilización nitrogenada. Promedios seguidos con letras distintas indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ( $P < 0,05$ ).



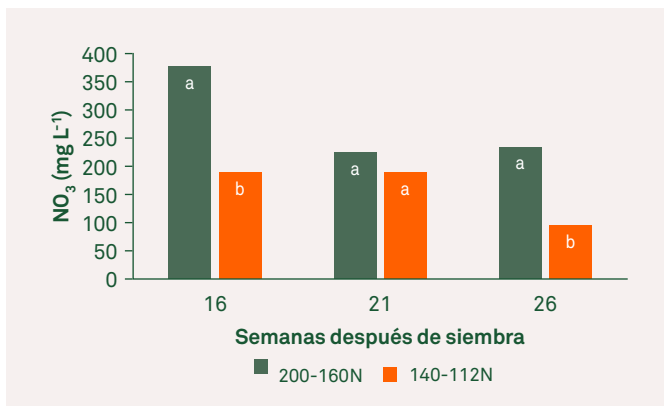
FUENTE: Baracaldo *et al.* (2018)

de fosfatos de calcio poco solubles, y, en consecuencia, aumentar la absorción de P; de igual manera se incrementa la absorción de micronutrientes como B, Fe, Mn y Zn (Neumann y Römheld, 2012); para Alloway (2008), dicho marcado efecto acidificante aumenta la disponibilidad de Zn. Por lo tanto, el efecto del aumento en la proporción de  $\text{NH}_4^+$  sobre el ion Zn puede atribuirse al impacto del  $\text{NH}_4^+$  sobre el pH de la rizosfera (figuras 4.2 y 4.4).

#### 4.2.2 Contenido de $\text{NO}_3^-$ en lixiviado

La concentración del ion  $\text{NO}_3^-$  en el lixiviado muestra diferencias estadísticamente significativas en función de la concentración del N total en la fórmula de fertirriego, lo cual se verificó en las 16 y 26 SDS, cuando el contenido de  $\text{NO}_3^-$  en el tratamiento 140-112 N fue menor en comparación con 200-160 N, con un 49,5 y 41,1 % menos  $\text{NO}_3^-$  en el lixiviado, respectivamente (figura 4.3). La diferencia no significativa en la 21 SDS probablemente se debe al cambio de fórmula de fertirriego de fase vegetativa a reproductiva. Hong *et al.* (2014) mostraron que los sistemas intensivos de producción de tomate en invernadero pueden llevar a valores de N lixiviado de hasta 788,6 kg ha<sup>-1</sup> (65,7 kg ha<sup>-1</sup> de N por día) equivalente al 89,4 % del  $\text{NO}_3^-$ -N aplicado. La magnitud de la pérdida de iones por lixiviación es proporcional a la concentración del elemento en la solución del suelo y a la cantidad de agua drenada (Ghiberto *et al.*, 2009).

➔ **Figura 4.3** Valores promedio del contenido de nitrato en el lixiviado de un sistema de cultivo sin suelo con plantas de clavel cv. Don Pedro, con disminución del N total en la fórmula de fertirriego. Promedios seguidos con letras distintas indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ( $P < 0,05$ ).



FUENTE: Baracaldo *et al.* (2018)



La diferencia de  $\text{NO}_3^-$  en el lixiviado es significativa en función de la concentración del N total, lo cual se verificó en las 16 y 26 SDS, con un contenido de  $\text{NO}_3^-$  entre tratamientos 49,5 y 41,1 % menor, respectivamente.





Se evidenció una disminución del pH en el sustrato en función del aumento en el porcentaje de  $\text{NH}_4^+$ , lo cual generaría un efecto benéfico al cultivo, en razón al uso de un sustrato con tendencia a valores de pH altos.

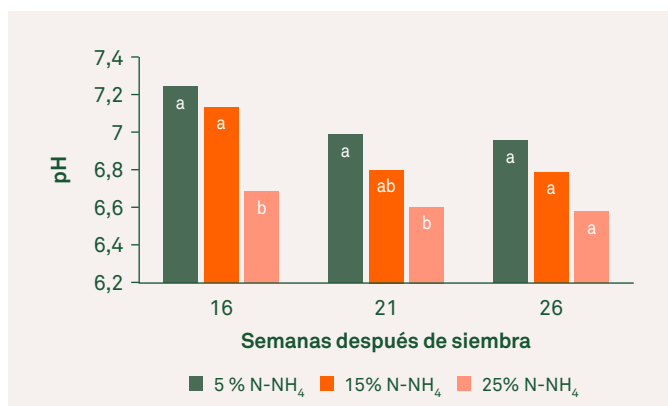
### 4.2.3 pH en el sustrato

Se evidencia una disminución del pH en el sustrato en la medida en que se aumenta el porcentaje de  $\text{NH}_4^+$ , con diferencias estadísticas significativas en las 16 y 21 SDS (figura 4.4). En geranio, petunia e *Impatiens*, Dickson *et al.* (2016) reportaron que el pH del sustrato varía con la especie y la relación  $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ . Con la solución de 0 %  $\text{NH}_4^+$  todas las especies mostraron una reacción básica, con valores mayores en petunia en comparación con las otras dos especies; en la solución con 10 %  $\text{NH}_4^+$ , geranio e *Impatiens* mostraron una reacción neutra y petunia básica, y en la solución con 20 %  $\text{NH}_4^+$ , geranio e *Impatiens* presentaron una reacción ácida, y en petunia sin diferencia del pH neutro. De manera similar, en *Ozothamnus diosmifolius*, Silber (2009) reportó que el aumento en la concentración de  $\text{NH}_4^+$ , por incremento en la concentración total de N o en la relación  $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ , resulta en una marcada disminución del pH, presentándose los menores valores (pH 4-5) en la concentración 150 de N total y en la relación 3:1. A pesar de que la toxicidad provocada por altas concentraciones de  $\text{NH}_4^+$  en la solución del suelo se debe a una marcada disminución del pH (Silber, 2009; Esteban *et al.*, 2016), como en el presente estudio se utilizó un sustrato con tendencia a valores de pH altos (pH ~7) (Vélez *et al.*, 2014), la disminución del pH en el sustrato habría generado un efecto benéfico al cultivo, con los valores alcanzados en los tratamientos con mayor porcentaje de amonio (pH = 6,6), lo cual, como es ampliamente descrito en la literatura (Taiz y Zeiger, 2002; Neumann y Römheld, 2012), aumenta la disponibilidad de la mayoría de los nutrientes.

### 4.2.4 Balance de nitrógeno

El contenido de N en el tejido vegetal no presentó diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos, mientras que el valor del contenido de N en lixiviado del tratamiento 200-160 N fue mayor que en el tratamiento con disminución del contenido de N en el fertirriego (tabla 4.2). Lo anterior evidencia una posible sobrefertilización con este

➔ **Figura 4.4** Valores promedio del pH en el sustrato de un sistema de cultivo sin suelo con plantas de clavel cv. Don Pedro sometidas a incrementos en el componente amoniacal de la fertilización nitrogenada. Promedios seguidos con letras distintas indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ( $P < 0,05$ ).



FUENTE: Baracaldo *et al.* (2018)

nutriente, en razón a que, a pesar de disminuir la concentración del N aplicado, no se presenta un menor contenido de N en el tejido vegetal, y se observa mayor pérdida de N en el lixiviado. Cabrera (2003), por el contrario, determinó en *Ilex* y *Lagerstroemia*, que son especies ornamentales leñosas, una relación directa entre la concentración de N aplicado en la solución de fertirriego y el porcentaje de este ion en el tejido foliar; sin embargo, las pérdidas de N por lixiviación se incrementaron de 17,4 %, en las plantas con la concentración más baja de N (15 mg L<sup>-1</sup>), a 52 % para las fertirrigadas con concentraciones mayores (210 y 300 mg L<sup>-1</sup>), resultados similares a los hallados en el presente estudio.

145

#### 4.2.5 Análisis de crecimiento

Entre los tratamientos evaluados, la fórmula con menos N total y menor porcentaje de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (140-112 N-5 % N-NH<sub>4</sub>) mostró un número de tallos por planta significativamente mayor que la fórmula con más N total, con los porcentajes más altos del componente amoniacal (tabla 4.3); entre tanto,

➔ **Tabla 4.2** Valores promedio del contenido de nitrógeno aplicado, absorbido y lixiviado en un sistema de cultivo sin suelo con plantas de clavel cv. Don Pedro sometidas a disminución de 30 % del N total en la fórmula de fertirriego.

NITRÓGENO	200-160 N*	140-112 N*
	(kg ha <sup>-1</sup> )	
Aplicado	1932	1551
Tejido vegetal	218,6 a	209,5 a
Lixiviado	1381,9 a	740,1 b

Promedios seguidos con letras distintas indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ( $P<0,05$ ).  
\*Concentraciones de N total (mg L<sup>-1</sup>) para las fases vegetativa y productiva del cultivo, respectivamente.  
**FUENTE:** Baracaldo *et al.* (2018)

para las variables longitud (promedio 89,6 cm) y diámetro del tallo floral (promedio 6,5 mm) no se encontraron diferencias significativas (datos no mostrados). Tampoco se constataron diferencias estadísticas significativas en las variables número de hojas (promedio de 29,1 hojas por tallo), longitud (entre 42 y 53 mm) y diámetro (promedio de 22 mm) del botón floral (datos no mostrados). De esta forma, se pone de manifiesto que es viable mantener atributos de calidad e incluso mejorar la productividad con una fórmula de fertirriego más conservadora en el componente nitrógeno.

➔ **Tabla 4.3** Valores promedio del número de tallos por planta en plantas de clavel estándar cv. Don Pedro sembrado en sustrato y sometido a disminución del N total y a incrementos en el componente amoniacal en la fórmula de fertirriego.

TRATAMIENTOS		SEMANA DESPUÉS DE SIEMBRA								
		10	12	14	16	18	20	22	24	26
N TOTAL (mg L <sup>-1</sup> )	N-NH <sub>4</sub> (%)	NÚMERO DE TALLOS POR PLANTA								
200-160*	5	8,3 a	8,5 ab	8,8 ab	9,2 ab	9,2 ab	8,8 ab	8,8 ab	8,8 ab	8,8 ab
	15	7,7 a	7,8 b	7,8 b	7,8 b	7,8 b	7,8 b	7,8 b	7,8 b	7,8 b
	25	7,8 a	8,2 ab	8,2 ab	8,2 b	8,2 b	8,2 b	8,2 b	8,2 b	8,1 b
140-112*	5	10,0 a	10,3 a	10,3 a	10,7 a	10,7 a	10,7 a	10,5 a	10,5 a	10,4 a
	15	9,0 a	9,0 ab	9,0 ab	9,2 ab	9,3 ab	9,3 ab	9,3 ab	9,3 ab	9,2 ab
	25	7,8 a	8,2 ab	8,2 ab	8,5 ab	8,5 ab	8,5 ab	8,5 ab	8,5 ab	8,4 ab
Error estándar		0,23	0,23	0,23	0,23	0,22	0,23	0,22	0,22	0,22

\*La primera concentración es la utilizada en el periodo vegetativo y la segunda en el periodo reproductivo.  
Promedios seguidos con letras distintas indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ( $P<0,05$ ).  
**FUENTE:** Baracaldo *et al.* (2019)

Este hallazgo es coherente con los aumentos significativos en variables de productividad y calidad reportados por Kumar *et al.* (2016) con hasta 150 mg L<sup>-1</sup> de N en plantas de clavel cv. Red Corso. Al respecto de la relación NO<sub>3</sub><sup>-</sup>:NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, de manera similar a lo aquí reportado, Khalaj *et al.* (2017) obtuvieron los mayores valores en las variables evaluadas en Gerbera cv. Stanza y Double Dutch con el menor porcentaje de amonio, es decir, la relación 80:20. Sin embargo, Dufour y Guérin (2005) encuentran en anturio mejoras en desarrollo y rendimiento con el aumento de la relación NH<sub>4</sub><sup>+</sup>:NO<sub>3</sub><sup>-</sup> hasta 0,37 del N total.

Este estudio corrobora que concentraciones de 140-112 mg L<sup>-1</sup> de N en las fases vegetativa y reproductiva, respectivamente, serían apropiadas para el normal desarrollo de las plantas, y que el número menor de tallos por planta en los tratamientos con mayor concentración de N total podría deberse a los mayores porcentajes de N-NH<sub>4</sub>.

#### 4.2.5.1 Tasas e índices de crecimiento

En Baracaldo *et al.* (2019) se muestran las tasas e índices calculados (IAF, RMF, AFE, TRC y TAN) que, aunque no presentaron diferencias estadísticas significativas en ninguno de los tres muestreos, indican las tendencias de dichas variables con la finalidad de entender el comportamiento fisiológico de las plantas sometidas a los tratamientos.

Según lo esperado, el IAF presentó un patrón de crecimiento gradual en todos los tratamientos, con tendencia a mostrar un mejor desempeño en los tratamientos con menor cantidad de N total, de forma independiente de la concentración de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (figura 4.5). Cuando el área foliar intercepta el máximo de radiación fotosintéticamente activa se obtiene el IAF óptimo (Hunt, 1978). Teniendo en cuenta el área foliar de plantas enteras de clavel cv. Nelson cultivadas en sustrato, Cárdenas *et al.* (2006) reportaron valores máximos de IAF entre 4,4 y 4,8; entre tanto, con el mismo cv., a segundo pico de cosecha, Baracaldo *et al.* (2010) informaron valores máximos entre 7,5 y 8,7, similares a los obtenidos en el presente estudio. Por lo aquí expuesto, los valores de IAF dependen, entre otros factores, del tipo de planta, variedad, estadio fenológico



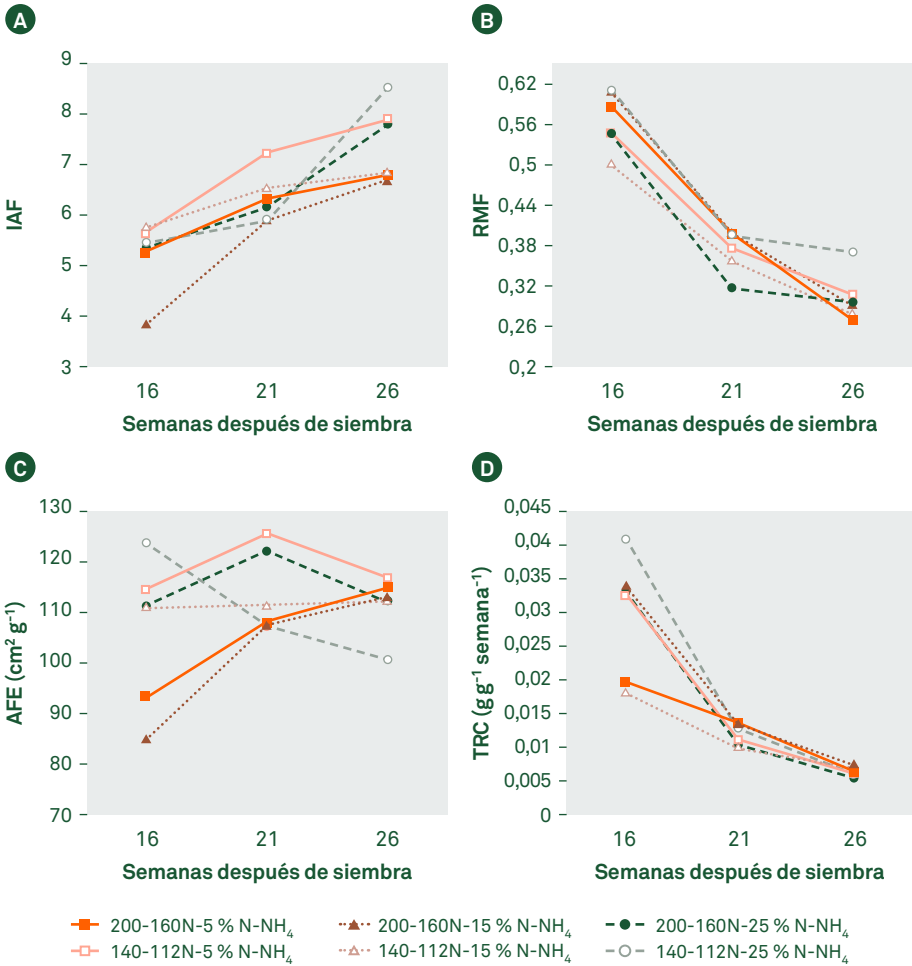
Con 140 - 112 mg L<sup>-1</sup> de N en las fases vegetativa y reproductiva, respectivamente, sería apropiado para el desarrollo de las plantas. Se mantienen atributos de calidad y productividad con fórmulas más conservadoras en N.





de desarrollo y manejo agronómico. Con un mejor uso de N por parte de la planta se optimiza el metabolismo del carbono, en razón a que estos metabolismos están regulados entre sí (Maldonado *et al.*, 2013), y el área foliar incide sobre la ganancia fotosintética de carbono, lo cual se refleja en la tasa de crecimiento de la planta (Taiz y Zeiger, 2002), por la síntesis de nueva biomasa.

➔ **Figura 4.5** Comportamiento de plantas de clavel cv. Don Pedro sembradas en sustrato y sometidas a incrementos en el componente amoniacal de dos fórmulas de fertirriego. **A.** Índice de área foliar (IAF); **B.** Relación masa foliar (RMF); **C.** Área foliar específica (AFE); **D.** Tasa relativa de crecimiento (TRC).



FUENTE: Baracaldo *et al.* (2019)

En todos los tratamientos se hace evidente un decrecimiento de la RMF desde el inicio del ensayo, lo que indica una inversión de fotoasimilados en la formación de otras estructuras de la planta. Los mayores valores de esta variable se presentaron en los tratamientos 200-160 N-15 % N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (fórmula comercial) y 140-112 N-25 % N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> a las 16 SDS. A pesar de que este último tratamiento presentaba una mayor proporción de amonio, la acumulación de masa seca foliar no se vio afectada.

En las fórmulas con más nitrógeno se observa una tendencia de mayor translocación de masa seca, en comparación con los tratamientos de las fórmulas más conservadoras. Cuando se aumenta a 25 % de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> en la fórmula alta en N, tiende a disminuir la cantidad de biomasa que se redirecciona hacia otras estructuras de la planta, por lo que se infiere que en el tratamiento 200-160 N-5 % N-NH<sub>4</sub> las plantas direccionarían mayor masa seca para la formación de botones florales, como se observa en la 26 SDS (tabla 4.4). El marcado decrecimiento de la RMF de la 16 a la 21 SDS en todos los tratamientos coincide con el momento de las máximas TAC para la formación de botones florales (18 y 19 SDS). Esta relación se ralentiza entre 21 y 26 SDS, en la medida en que dichas estructuras alcanzan su desarrollo definitivo.

En la figura 4.5C se muestra el comportamiento del AFE. Si bien en los tratamientos 200-160 N-5 % N-NH<sub>4</sub> y 200-160 N-15 % N-NH<sub>4</sub> a la 16 SDS se inicia con un menor AFE, junto con los tratamientos 200-160 N-25 % N-NH<sub>4</sub> y 140-112 N-5 % N-NH<sub>4</sub> conforman un mismo perfil de respuesta; es decir, disponen de una mayor área foliar en relación con su masa seca, comportándose entre la 16 y la 21 SDS como fuentes de carbohidratos para los órganos vertederos. Los demás tratamientos, aunque son fuentes de asimilados, exportan de manera menos eficiente: en 140-112 N-15 % N-NH<sub>4</sub> se exporta lo que se sintetiza, sin afectar el AFE, y en 140-112 N-25 % N-NH<sub>4</sub> se transloca menos de lo que se sintetiza, disminuyendo el AFE y manteniendo buena parte de la biomasa que sintetiza en las hojas (tabla 4.4). Un alto AFE indica mayor área foliar con hojas livianas y, en consecuencia, mayor capacidad de captación de luz y elaboración de carbohidratos.



Con el aumento a 25 % de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> en la fórmula alta en N se disminuiría la partición de biomasa a otras estructuras de la planta; por tanto, en el tratamiento con 5 % se direccionaría mayor masa hacia los botones florales.



➔ **Tabla 4.4** Valores promedio de masa seca de plantas de clavel cv. Don Pedro sembradas en sustrato, con disminución del N total e incrementos en el componente de  $\text{N-NH}_4^+$  en la fórmula de fertirriego.

SEMANA DESPUÉS DE SIEMBRA	TRATAMIENTO		MASA SECA (g)				
	N TOTAL ( $\text{mg L}^{-1}$ )	N- $\text{NH}_4$ (%)	HOJAS	TALLOS	RAÍZ	BOTÓN	TOTAL
16	200-160*	5	16,9	11,1	1,0		29,0
		15	13,5	7,9	0,7		22,1
		25	15,0	12,4	0,8		28,2
	140-112*	5	15,4	11,7	0,9		28,0
		15	15,5	14,2	0,9		30,6
		25	12,9	7,7	0,6		21,2
21	200-160*	5	17,6	25,8	1,7	3,3	48,4
		15	16,4	23,1	0,9	0,9	41,4
		25	15,1	27,7	1,3	2,3	46,5
	140-112*	5	17,2	25,6	1,6	1,1	45,4
		15	18,0	28,3	1,4	1,8	49,4
		25	16,4	22,3	1,8	1,3	41,8
26	200-160*	5	17,7	33,1	2,9	12,3	65,9
		15	17,7	32,1	2,3	8,2	60,3
		25	20,9	35,2	2,6	7,6	66,3
	140-112*	5	20,2	35,0	2,4	10,8	68,4
		15	18,3	36,9	2,1	8,0	65,4
		25	25,8	33,5	2,1	11,2	72,6

\*La primera concentración es la utilizada en el periodo vegetativo, y la segunda en el periodo reproductivo.

FUENTE: Baracaldo et al. (2019)

Una respuesta de incremento del AFE señala partición constante de carbohidratos hacia vertederos con alta demanda. Con las fórmulas de fertirriego más conservadoras en N total, el componente amoniacal desempeñaría un papel preponderante, donde el porcentaje más alto afecta negativamente el AFE, como ocurre con el tratamiento 140-112 N-25 %  $\text{N-NH}_4$  (figura 4.5C).

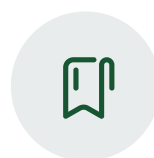
Para la TRC se observan dos grupos de respuesta (figura 4.5D): en el grupo de tratamientos con TRC más alta se destaca 140-112 N-25 %  $\text{N-NH}_4$ , con lo cual se entiende que es el tratamiento más eficiente en la acumulación de nueva biomasa al sistema. Este comportamiento se refleja en las hojas

con el AFE más bajo hacia la 26 SDS (figura 4.5C), lo cual se explica al disminuir el área foliar y aumentar su biomasa, como se constata en la tabla 4.4, donde también se verifica que en este tratamiento la planta invirtió más masa seca en hojas y en botón floral, a expensas del tallo y la raíz. En el segundo grupo, de TRC iniciales más bajas (200-160 N-5 % N-NH<sub>4</sub> y 140-112 N-15 % N-NH<sub>4</sub>), independientemente de la concentración de N total, no se encuentran los porcentajes de amonio más altos; estos estimularían la acumulación de nueva biomasa inicial. Según Grime y Hunt (1975), los valores más altos de TRC se obtienen en las plantas que crecen en condiciones de mayor fertilidad. En gerbera, el aumento de la proporción de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> en la solución de nutrientes tuvo como resultado mayores masas fresca y seca en la parte aérea y la raíz, con valores más altos en la relación 80:20 (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>:NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) (Khalaj *et al.*, 2017).

#### 4.2.6 Productividad y calidad

Teniendo en cuenta el factor nitrógeno, no se encontró diferencia estadística significativa entre los tratamientos 200-160 N y 140-112 N, con promedios de productividad de 83,5 y 87,9 tallos/m<sup>2</sup> de área de invernadero, respectivamente, de lo que se infiere que el mismo nivel de productividad se puede alcanzar con menos nitrógeno total en la fórmula. Sin embargo, los incrementos en las dosis de N usados por Thakulla *et al.* (2018) en clavel exótico var. Chabaud tuvieron un efecto positivo en la mayoría de los parámetros atribuidos a crecimiento y floración, con excepción de la máxima dosis que retardó el tiempo hasta el inicio de la floración.

De otro lado, habría disminución del porcentaje de tallos en el grado de calidad Select en la medida en que se aumenta el porcentaje de amonio, con el consecuente incremento del porcentaje de tallos en el grado de calidad Fancy (figura 4.6). Una productividad de cuatro tallos más por m<sup>2</sup>, con un grado de calidad superior, así como la economía en el costo del fertilizante y en el impacto ambiental redundarían en el ejercicio financiero del productor.

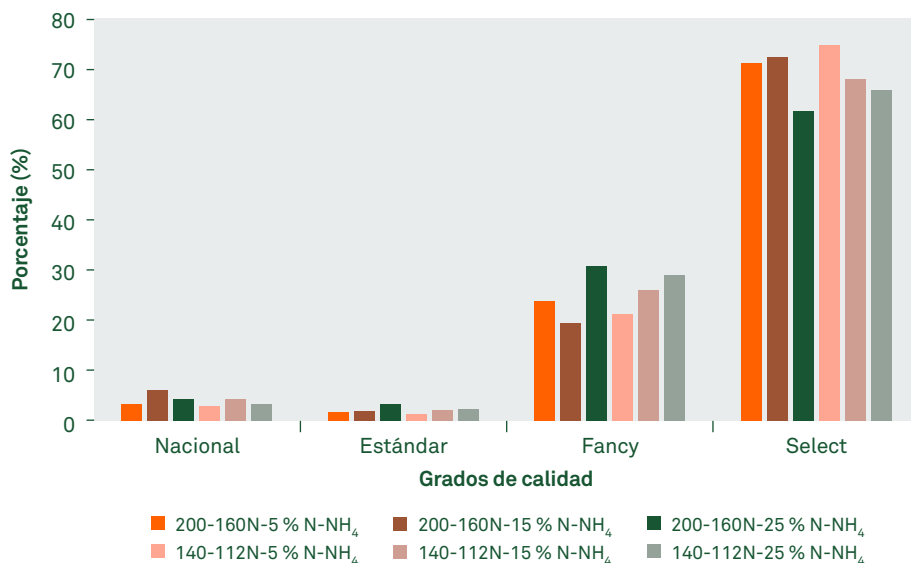


151

En las fórmulas más conservadoras en N total, el componente amoniacal desempeñaría un papel preponderante, donde el porcentaje más alto afecta negativamente el AFE, ralentizando la partición de carbohidratos a vertederos.



➔ **Figura 4.6** Calidad de tallos florales de clavel cv. Don Pedro de plantas sembradas en sustrato sometidas a distintos tratamientos de fertilización nitrogenada



FUENTE: Baracaldo *et al.* (2019)

152

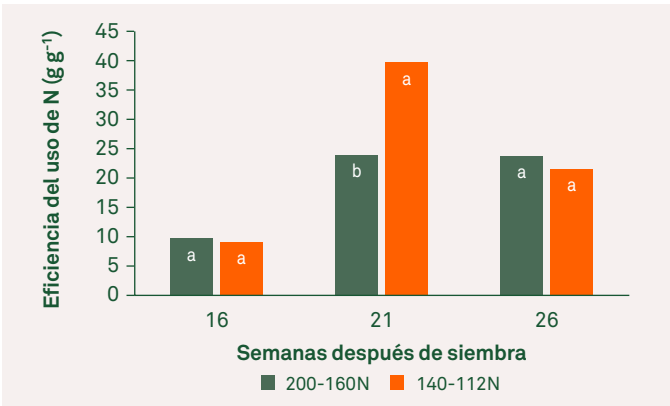
Los logros en productividad y en atributos de calidad en función de relaciones particulares de  $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$  fueron abordados por Tabatabaei *et al.* (2006) en fresa, con fundamento en mejor nutrición a base de calcio e incrementos en área foliar y tasa de fotosíntesis, y, para la misma especie, con mejores valores de SPAD y rendimiento cuántico del PSII (Fv/Fm) (Roosta, 2014), o en tulipán, con máximas concentraciones de Ca y Mg, longevidad floral, masa seca y óptimos de N, P y K (Abasi *et al.*, 2016).

#### 4.2.7 Eficiencia del uso del nitrógeno (EUN)

En la figura 4.7 se pone de manifiesto que en la 21 SDS se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, con un valor mayor en la EUN para las plantas del tratamiento 140-112 N en comparación con el tratamiento de mayor concentración de N; esto indica que la ganancia de esa masa seca tuvo como resultado un uso más

eficiente de N. La producción de masa seca está estrechamente relacionada con la EUN, y como en el experimento no se encontraron diferencias estadísticamente significativas en los valores de masa seca (tabla 4.4), por ende las plantas fertilizadas con la concentración de N más baja presentan valores más altos de EUN. Para lograr una mayor EUN en clavel cv. Gaduina, según Muthukrishnan *et al.* (2014), se requiere una liberación constante del N incorporado al suelo.

➔ **Figura 4.7** Valores promedio de la eficiencia en el uso de nitrógeno en plantas de clavel cv. Don Pedro sembradas en sustrato bajo distintos tratamientos de fertilización nitrogenada. Promedios seguidos con letras distintas indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ( $P<0,05$ ).



FUENTE: Baracaldo *et al.* (2019)

## 4.3 Conclusiones

La disminución de N total en la fórmula de fertirriego generó un contenido mayor de Cu y Zn en el tejido vegetal, sin diferencia en el contenido de N en el tejido vegetal, y con menor contenido del N en el lixiviado. Con lo anterior se obtiene una mejor EUN, que mitiga el impacto ambiental negativo de este nutriente en el medio ambiente. En las 16 y 26 SDS, el contenido de  $\text{NO}_3^-$  en el lixiviado fue menor en el tratamiento 140-112 N en comparación con el tratamiento 200-160 N, con 49,5 y 41,1 % menos  $\text{NO}_3^-$ , respectivamente.



Con ambas fórmulas se obtuvieron productividades y calidades similares. El número de tallos florales por planta y el porcentaje en el grado de calidad Select disminuirían en función del aumento del componente amoniacal.

El aumento de la relación  $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$  incrementó los contenidos de N y Zn y disminuyó el de Mg en el tejido vegetal; también disminuyó el pH de los sustratos.

En ambas fórmulas de fertirriego se obtuvieron productividades y calidades similares, y el componente amoniacal desempeña un papel preponderante: el número de tallos florales por planta disminuiría en la medida que se aumenta este componente, de manera similar a lo observado con el porcentaje de tallos florales en grado de calidad Select.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la Asociación Colombiana de Exportadores de Flores (Asocolflores), al Centro de Innovación de la Floricultura Colombiana (Ceniflores), a la Universidad Nacional de Colombia, a la Universidad de La Salle, a la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia) y, en especial, a la Gobernación de Cundinamarca por la posibilidad de participar en la ejecución del proyecto “Fortalecimiento de la competitividad del sector floricultor colombiano mediante el uso de ciencia, tecnología e innovación aplicadas en Cundinamarca”. De igual manera, a las compañías Brenntag Colombia S.A., Productos Químicos Andinos S.A. y Avgust Crop Protection, por el gentil suministro de las soluciones fertilizantes, los materiales plásticos de cubierta y los productos para control fitosanitario utilizados en esta investigación, respectivamente.

## Conflictos de interés y contribuciones de autoría

El manuscrito fue preparado y revisado de manera conjunta por los autores, quienes declaran no tener ningún conflicto de interés que comprometa la validez de los resultados aquí presentados.

## Referencias

- Abasi, H., M. Babalar, H. Lessani y R. Naderi. 2016. Effects of nitrogen form of nutrient solution on uptake and concentration macro element and morphological trait in hydroponic tulip. *J. Plant Nutr.* 39(12):1745-1751. DOI: 10.1080/01904167.2016.1201110.
- Acuña C., J.F. y D.M. Ortiz P. 2004. Estructuras de invernadero: la experiencia colombiana. pp. 83-107. En: Acuña C., J.F., D.L. Valera M. y J.C. Avendaño (eds.). *Invernaderos: La experiencia iberoamericana*. Almería: Programa Cyted. 197p.
- Alloway, B.J. 2008. Zinc in soils and crop nutrition, 2.<sup>a</sup> ed. París: IZA e IFA. 135p.
- Baracaldo A., A. del P., A. Ibagué O. y V.J. Flórez R. 2010. Tasas e índices de crecimiento a segundo pico de cosecha en clavel estándar cv. Nelson cultivado en suelo y en sustratos. *Agron. Colomb.* 28(2):209-217. Disponible en: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/18063/37682>. Consulta: junio de 2020.
- Baracaldo, A. del P., M.C. Díaz, V.J. Flórez, C.A. González. 2018. Efecto de la disminución de N total y aumento de  $\text{NH}_4^+$  en la fórmula de fertirriego en el cultivo de clavel. *Rev. Colomb. Cienc. Hortic.* 12(3):658-667. DOI: 10.17584/rcch.2018v12i3.8062.
- Baracaldo, A. del P., V.J. Flórez y C.A. González. 2019. Es posible mantener estándares de productividad y calidad en clavel con menos nitrógeno en la fórmula de fertirriego. *Rev. Colomb. Cienc. Hortic.* 13(2):279-290. DOI: 10.17584/rcch.2019v13i2.8068.
- Barker, A. y G. Bryson. 2007. Nitrogen. pp. 22-23. En: Barker, A.V. y D.J. Pilbeam (eds.). *Handbook of plant nutrition*. Boca Raton: CRC Press-Taylor and Francis. 632p.
- Bar-Yosef, B. 2008. Fertigation management and crops response to solution recycling in semi-closed greenhouses. pp. 341-424. En: Raviv, M. y J.H. Lieth (eds.). *Soilless culture: theory and practice*. 1.<sup>a</sup> ed. Oxford: Elsevier, 608p. DOI: 10.1016/B978-044452975-6.50011-3.





- Broadley, M., P. Brown, I. Cakmak, Z. Rengel y F. Zhao. 2012. Function of nutrients: micronutrients. pp. 191-248. En: Marschner, P. (ed.). Mineral nutrition of higher plants. 3.<sup>a</sup> ed. Ámsterdam: Elsevier. 672p. DOI: 10.1016/B978-0-12-384905-2.00007-8.
- Cabrera, R.I. 2003. Nitrogen balance for two container-grown woody ornamental plants. *Sci. Hortic.* 97(3-4):297-308. DOI: 10.1016/S0304-4238(02)00151-6.
- Cabrera, R.I. 2006. Consideraciones sobre nutrición mineral y fertilización en rosas. pp. 145-161. En: Flórez R., V.J., A. de la C. Fernández, D. Miranda, B. Chaves C. y J.M. Guzmán P. (eds.). Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana. Bogotá: Unibiblos. 500p.
- Cámara de Comercio de Bogotá (CCB). 2015. Manual flores y follajes: programa de apoyo agrícola y agroindustrial. Vicepresidencia de Fortalecimiento Empresarial, Bogotá. 41p.
- Cameron, K.C., H.J. Di y J.L. Moir. 2013. Nitrogen losses from the soil/plant system: a review. *Ann. Appl. Biol.* 162(2):145-173. DOI: 10.1111/aab.12014.
- Cárdenas M., C.A., I.F. Rivera G., V.J. Flórez R., B. Chaves C. y W. Piedrahíta C. 2006. Growth analysis of standard carnation cv. "Nelson" in different substrates. *Acta Hortic.* 718:623-629. DOI: 10.17660/ActaHortic.2006.718.73.
- Carrillo P., I.F., B. Mejía M. y A. Franco H.F. 1994. Manual de laboratorio para análisis foliares. Cenicafé, Chinchiná. 52p.
- Casas O., N.R., 2015. Evaluación de la modificación del contenido de nitrógeno en una fórmula de fertirriego usada en el cultivo de miniclavel variedad Rony cultivado en sustrato. Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.
- Cui, J., C. Yu, N. Qiao, X. Xu, Y. Tian y H. Ouyang. 2017. Plant preference for  $\text{NH}_4^+$  versus  $\text{NO}_3^-$  at different growth stages in an alpine agroecosystem. *F. Crop. Res.* 201(3):192-199. DOI: 10.1016/j.fcr.2016.11.009.
- Dickson, R.W., P.R. Fisher, W.R. Argo, D.J. Jacques, J.B. Sartin, L.E. Trenholm y T.H. Yeager. 2016. Solution ammonium: nitrate ratio and cation/anion uptake affect acidity or basicity with floriculture species in hydroponic

- nics. *Sci. Hortic.* 200(2016):36-44. DOI: 10.1016/j.scienta.2015.12.034.
- Dufour, L. y V. Guérin. 2005. Nutrient solution effects on the development and yield of *Anthurium andreanum* Lind. in tropical soilless conditions. *Sci. Hortic.* 105(2):269-282. DOI: 10.1016/j.scienta.2005.01.022.
- EPA (United States Environmental Protection Agency) 2009. National primary drinking water regulations. EPA 816-F-09-004. Disponible en: <https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulation-table>. Consulta: junio 2020.
- Escandón L., J.D. 2009. Propuesta logística para el desarrollo de la exportación de rosas y claveles a Estados Unidos para la comercializadora Export Flexy Ltda. Tesis de grado. Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia. 143p.
- Esteban, R., I. Ariz, C. Cruz y J.F. Moran. 2016. Review: Mechanisms of ammonium toxicity and the quest for tolerance. *Plant Sci.* 248(2016):92-101. DOI: 10.1016/j.plantsci.2016.04.008.
- Fageria, F.K. 2016. Functions of nitrogen in crop plants. pp. 1-66. En: Fageria, F.K. (ed.). Nitrogen management in crop production. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group. 436p.
- FAO. 2017. World fertilizer trends and outlook to 2020. Summary report. Rome: Food and Agriculture Organization of United Nations. 27p.
- Flórez, R., V.J., R. Parra R., M. Rodríguez S. y D.E. Nieto C. 2006a. Características y fundamentos del proyecto “Producción más limpia de rosa y clavel con dos técnicas de cultivo sin suelo en la Sabana de Bogotá”. pp. 3-40. En: Flórez R., V.J., A. de la C. Fernández M., D. Miranda L., B. Chaves C. y J. M. Guzmán P. (eds.). Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana. Bogotá: Unibiblos. 500p.
- Flórez R., V.J., D. Miranda L., B. Chaves C., L.A. Chaparro T., C.A. Cárdenas M. y A. Farías A. 2006b. Parámetros considerados en el análisis de crecimiento en rosa y clavel en los sistemas de cultivo en suelo y en sustrato. pp 43-52. En: Flórez R., V.J., A. de la C. Fernández, D. Miranda



- L., B. Chaves C. y J.M. Guzmán P. (eds). Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana. Bogotá: Unibiblos. 500p.
- Florián-Martínez, P. y D. Roca. 2011. Sustratos para el cultivo sin suelo. Materiales, propiedades y manejo. pp. 37-78. En: Flórez R., V.J. (ed.). Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. 292p.
- Gárate A. e I. Bonilla. 2013. Nutrición mineral y producción vegetal. pp. 143-164. En: Azcón-Bieto, J. y M. Talón. (ed.). 2.<sup>a</sup> ed. Fundamentos de fisiología vegetal. Madrid: McGraw Hill- Interamericana de España S.L. 651p.
- Ghiberto, P.J., P.L. Libardi, A.S. Brito y P.C.O. Trivelin. 2009. Leaching of nutrients from a sugarcane crop growing on an ultisol in Brazil. *Agric. Water Manag.* 96(10):1443-1448. DOI: 10.1016/j.agwat.2009.04.020.
- González G., J.L., M. de las N. Rodríguez M., P. Sánchez G. y E.A. Gaytán A. 2009. Relación amonio/nitrato en la producción de hierbas aromáticas en hidroponía. *Agric. Téc. Méx.* 35(1):5-11. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/agritm/v35n1/v35n1a1.pdf>. Consulta: junio de 2020.
- Good, A.G., Shrawat, A.K. y D.G. Muench. 2004. Can less yield more? Is reducing nutrient input into the environment compatible with maintaining crop production? *Trends Plant Sci.* 9(12):597-605. DOI: 10.1016/j.tplants.2004.10.008.
- Grime, J.P. y R. Hunt. 1975. Relative growth-rate: its range and adaptive significance in a local flora. *J. Ecol.* 63(2):393. DOI: 10.2307/2258728.
- Hawkesford, M., W. Horst, T. Kichey, H. Lambers, J. Schjoerring, I. Møller y P. White. 2012. Functions of macronutrients. pp 135-189. En: Marschner, P. (ed.). *Mineral nutrition of higher plants*, 3.<sup>a</sup> ed. San Diego: Academic Press. 672p.
- Helali, S.M., H. Nebli, R. Kaddour, H. Mahmoudi, M. Lachaâl y Z. Ouerghi. 2010. Influence of nitrate-ammonium ratio on growth and nutrition of *Arabidopsis thaliana*. *Plant Soil.* 336(1):65-74. DOI: 10.1007/s11104-010-0445-8.

- Hirel, B. y A. Krapp. 2020. Nitrogen utilization in plants I Biological and agronomic importance. Encyclopedia of Biochemistry. 3.<sup>a</sup> ed. París: Elsevier. 14p. DOI: 10.1016/B978-0-12-809633-8.21265-X.
- Hong, E.M., J.Y. Choi, W.H. Nam, M.S. Kang y J.R. Jang. 2014. Monitoring nutrient accumulation and leaching in plastic greenhouse cultivation. Agric. Water Manag. 146:11-23. DOI: 10.1016/j.agwat.2014.07.016.
- Hunt, R. 1978. Plant growth analysis. London: Edward Arnold Publishers. 67p.
- Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) y Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). 2015. Relación entre el consumo aparente de fertilizantes y la superficie bajo uso agrícola. Disponible en DANE. [www.dane.gov.co](http://www.dane.gov.co). Consulta: abril de 2017.
- Jin, X., G. Yang, C. Tan y C. Zhao. 2015. Effects of nitrogen stress on the photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation, chlorophyll fluorescence, and sugar-nitrogen ratio in corn. Sci. Rep. 5:1-9. DOI: 10.1038/srep09311.
- Kant, S. 2018. Understanding nitrate uptake, signaling and remobilisation for improving plant nitrogen use efficiency. Semin. Cell Dev. Biol. 74:89-96. DOI: 10.1016/j.semcdb.2017.08.034.
- Khalaj, M.A., S. Kiani, A.H. Khoshgoftarmanesh y R. Amooghaie. 2017. Growth, quality, and physiological characteristics of gerbera (*Gerbera jamesonii* L.) cut flowers in response to different NO<sub>3</sub><sup>-</sup>:NH<sub>4</sub><sup>+</sup> ratios. Hortic. Environ. Biotechnol. 58(4):313-323. DOI: 10.1007/s13580-017-0067-7.
- Kiba, T., T. Kudo, M. Kojima y H. Sakakibara. 2011. Hormonal control of nitrogen acquisition: Roles of auxin, abscisic acid, and cytokinin. J. Exp. Bot. 62(4):1399-1409. DOI: 10.1093/jxb/erq410.
- Kraiser T., D. Gras, A. Gutiérrez, B. González y R. Gutiérrez. 2011. A holistic view of nitrogen acquisition in plants. J. Exp. Bot. 62(4):1455-1466. DOI: 10.1093/jxb/erq425.
- Kumar, A., G.S. Rana, R. Sharma, Prince y D.S. Dahiya. 2016. Flowering of carnation as influenced by different levels



- of nitrogen and *Azotobacter* strains. *Indian Hortic. J.* 6(2):222-225. DOI: 283-16-ihj-1402-2016-57.
- Kumar, V., V.S. Ahlawat y R.S. Antil. 1985. Interactions of nitrogen and zinc in pearl millet: 1. Effect of nitrogen and zinc levels on dry matter yield and concentration and uptake of nitrogen and zinc in pearl millet. *Soil Sci.* 139:351-356. DOI: 10.1097/00010694-198504000-00009.
- Li, J., J.M. Zhou y Z.Q. Duan. 2007. Effects of elevated CO<sub>2</sub> concentration on growth and water usage of tomato seedlings under different ammonium/nitrate ratios. *J. Environ. Sci.* 19(9):1100-1107. DOI: 10.1016/S1001-0742(07)60179-X.
- Liu, G., Q. Duy J. Li. 2017. Interactive effects of nitrate-ammonium ratios and temperatures on growth, photosynthesis, and nitrogen metabolism of tomato seedlings. *Sci. Hortic.* 214(1):41-50. DOI: 10.1016/j.scienta.2016.09.006.
- Lorenzo, H., M.C. Cid. J.M. Siverio y M. Caballero. 2000. Influence of additional ammonium supply on some nutritional aspects in hydroponic rose plants. *J. Agric. Sci.* 134(4):421-425. DOI: 10.1017/S0021859699007728.
- Lorenzo, P., Medrano, E. y García, M. 1993. Irrigation management in perlite. *Acta Hortic.* 335:429-434. DOI: 10.17660/ActaHortic.1993.335.52.
- Lupini, A., M.P. Princi, F. Araniti, A.J. Miller, F. Sunseri y M.R. Abenavoli. 2017. Physiological and molecular responses in tomato under different forms of N nutrition. *J. Plant Physiol.* 216:17-25. DOI: 10.1016/j.jplph.2017.05.013.
- Maldonado, J.M., E. Agüera y R. Pérez-Vicente. 2013. Asimilación del nitrógeno y del azufre. pp. 287-303. En: Azcón-Bieto, J. y M. Talón. (ed.). 2.<sup>a</sup> ed. *Fundamentos de fisiología vegetal*. Madrid: McGraw Hill-Interamericana de España S.L. 651p.
- Mengel, K. y E.A. Kirkby. 2001. *Principles of plant nutrition*, 5.<sup>a</sup> ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 849p.
- Muthukrishnan, R., K. Arulmozhiselvan, M. Jawaharlal, T. Padmavathi, V.P. Duraisami, S. Krishnakumar y S. Rameshkumar. 2014. Recovery of fertilizer nitrogen by carnation grown with nutri-pellet pack and soil nitrogen

- retention using 15 N tracer. *Res. Environment Life Sci.* 7(4):271-274.
- Nacry, P., E. Bouguyon y A. Gojon. 2013. Nitrogen acquisition by roots: physiological and developmental mechanisms ensuring plant adaptation to a fluctuating resource. *Plan. Soil.* 310:1-29. DOI: 10.1007/s11104-013-1645-9.
- Navarro, S. y G. Navarro. 2003. *Química agrícola*. 2.<sup>a</sup> ed. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa. 487p.
- Neumann, G. y V. Römheld. 2012. Rhizosphere chemistry in relation to plant nutrition. pp. 347-368. En: Marschner, P. (ed.). *Mineral nutrition of higher plants*. 3.<sup>a</sup> ed. Amsterdam: Elsevier. 672p.
- Observatorio Ambiental de Bogotá (OAB). 2019. Documentos e investigación: Decreto 1594 de 1984. Disponible en: <http://oab.ambientebogota.gov.co/es/con-lacomunidad/decreto-1594-de-1984>. Consulta: mayo de 2019.
- Ordóñez D., N. y A. Bolívar G. 2014. Levantamiento agrológico del Centro Agropecuario Marengo (CAM). Imprenta Nacional de Colombia. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC. 392p.
- Parra T., S., P. Lara M., M. Villareal R. y S. Hernández V. 2012. Crecimiento de plantas y rendimiento de tomate en diversas relaciones nitrato/amonio y concentraciones de bicarbonato. *Rev. Fitotec. Mex.* 35(2):143-153. Disponible en: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-738020120002000006&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-738020120002000006&lng=es&nrm=iso). Consulta: junio de 2020.
- Rehman, A., M. Farooq, L. Ozturk, M. Asif y K.H.M. Siddique. 2018. Zinc nutrition in wheat-based cropping systems. *Plant Soil.* 422(1-2):283-315. DOI: 10.1007/s11104-017-3507-3.
- Reid, M. y D. Hunter. 2000. Manejo de la poscosecha. *Biología y tecnología de la poscosecha*. pp. 165-181. En: Pizano de Marquez, M. (ed.). *Clavel (*Dianthus caryophyllus*)*. Bogotá: Ediciones Hortitecna Ltda. 181p.
- Rice, E.W., R.B. Baird, A.D. Eaton y L.S. Clesceri. 1967. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 12.<sup>a</sup> ed. Washington D.C.: American Public Health Association, American Water Works Association. 769p.



- Roosta, H.R. 2014. Effect of ammonium: nitrate ratios in the response of strawberry to alkalinity in hydroponics. *J. Plant Nutr.* 37(10):1676-1689. DOI: 10.1080/01904167.2014.888749.
- Savvas, D., H.C. Passam, C. Olympios, E. Nasi, E. Moustaka, N. Mantzos y P. Barouchas. 2006. Effects of ammonium nitrogen on lettuce grown on pumice in a closed hydroponic system. *HortScience*. 41(7):1667-1673. DOI: 10.21273/HORTSCI.41.7.1667.
- Silber, A. 2009. Impact of solution-NH<sub>4</sub> concentrations on soilless-grown plants: Benefits and constraints. *Acta Hort.* 819:373-380. DOI: 10.17660/ActaHort.2009.819.45.
- Tabatabaei, S.J., L.S. Fatemi y E. Fallahi. 2006. Effect of ammonium: nitrate ratio on yield, calcium concentration, and photosynthesis rate in strawberry. *J. Plant Nutr.* 29(7):1273-1285. DOI: 10.1080/01904160600767575.
- Taiz L. y E. Zeiger. 2002. *Plant physiology*. 3.<sup>a</sup> ed. Sunderland: Sinauer Associates Publishers. 690p.
- Thakulla, D., A. Khanal y L.R. Bhatta. 2018. Adaptability of exotic variety of carnation (*Dianthus Caryophyllus* var. Chabaud) under different doses of nitrogen. *Int. J. Hort. Agric.* 3(2):1-3. DOI: 10.15226/2572-3154/3/2/00120.
- Ucar, Y., S. Kazaz, F. Eraslan y H. Baydar. 2017. Effects of different irrigation water and nitrogen levels on the water use, rose flower yield and oil yield of *Rosa damascena*. *Agric. Water Manag.* 182:94-102. DOI: 10.1016/j.agwat.2016.12.004.
- Vélez C., N.A. 2012. Comportamiento de macronutrientes en un sistema de cultivo sin suelo para clavel estándar cv. Delphi con recirculación de drenajes en la Sabana de Bogotá. Tesis de maestría. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.
- Vélez C., N.A., V.J. Flórez R. y A.F. Flórez R. 2014. Comportamiento de variables químicas en un sistema de cultivo sin suelo para clavel en la Sabana de Bogotá. *Rev. Fac. Nac. Agron. Medellín*. 67(2):7281-7290. DOI: 10.15446/rfnam.v67n2.44170.

- Vojtišková, L., E. Munzarová, O. Votrubová, A. Rihová y B. Juřicová. 2004. Growth and biomass allocation of sweet flag (*Acorus calamus* L.) under different nutrient conditions. *Hydrobiologia*. 518:9-22. DOI: 10.1023/B:HYDR.0000025052.81373.f3.
- World Health Organization (WHO). 2011. Guidelines for drinking-water quality. 4.<sup>a</sup> ed. Ginebra: World Health Organization. 541p.
- Yang, Y., J. Xiong, L. Tao, Z. Cao, W. Tang, J. Zhang, X. Yu, G. Fu, X. Zhang y Y. Lu. 2020. Regulatory mechanisms of nitrogen (N) on cadmium (Cd) uptake and accumulation in plants: A review. *Sci. Total. Environ.* 708:135-186. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135186.
- Žanić, K., G. Dumičić, M. Škaljac, S.G. Ban y B. Urlić. 2011. The effects of nitrogen rate and the ratio of  $\text{NO}_3^-:\text{NH}_4^+$  on *Bemisia tabaci* populations in hydroponic tomato crops. *Crop Prot.* 30(2):228-233. DOI: 10.1016/j.cropro.2010.11.004.





# BRENNTAG

**Agrofeed®**  
Fertilizante a la medida  
Sólido y líquido

**Quelafeed®**  
Elementos menores

**Fosfeed®**  
Fosfitos

*Linea*  
**FLORÍSSIMA®**  
Prolonga la vida de sus flores

**La Solución perfecta  
en nutrición y poscosecha**

**Brenntag Colombia S.A.**

**División Agrícola**

**[www.brenntagla.com](http://www.brenntagla.com)**



CONTENIDO





# 5

## CAPÍTULO



# Automatización de la aplicación de productos fitosanitarios en flores de corte\*

Jairo Orlando Montoya Gómez<sup>1</sup>, José Luis Rubiano Fernández<sup>2</sup>, Jorge Eliécer Rangel Díaz<sup>3</sup> y Pedro Fernando Martín Gómez<sup>4</sup>

## RESUMEN

**Se desarrolló un sistema automático** de aplicación de plaguicidas para cultivos de rosa en invernadero, en busca de una aplicación más uniforme, con el fin de obtener un mejor resultado del tratamiento sobre el cultivo, con mayor velocidad de aplicación frente a los métodos manuales tradicionales, así como para disminuir los riesgos que implican para la salud de los operarios. Con el sistema automático desarrollado se logra un uso más racional de los productos químicos aplicados, y se contribuye a disminuir los efectos adversos sobre el ambiente. Este sistema móvil ubicado en una nave de invernadero puede ser utilizado en forma manual y automática; con diferentes velocidades, para aplicar en una sola pasada el plaguicida especificado por el personal responsable. Por su versatilidad, este sistema permite ser utilizado también para aplicaciones de riego o fertirriego como complemento a las labores requeridas sobre el cultivo. Finalmente, se encontró que este sistema recorre la nave en menor tiempo que el requerido por los operarios asignados a dicha labor.

167

\* Para citar este capítulo: Montoya G., J.O., J.L. Rubiano F., J.E. Rangel D. y P.F. Martín G. 2021. Automatización de la aplicación de productos fitosanitarios en flores de corte. En: Flórez R., V.J. (ed.). Productos relevantes del proyecto Fortalecimiento de la competitividad del sector floricultor colombiano mediante el uso de ciencia, tecnología e innovación aplicadas en Cundinamarca. Bogotá: Ediciones Unisalle, Ceniflores. pp. 166-193.

**1.** Ingeniero electromecánico, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, sede Duitama. Magíster en Ingeniería Mecánica, Universidad de los Andes. Profesor asociado de la Facultad de Ingeniería, Ingeniería en Automatización. Universidad de La Salle, Bogotá, D.C. Correo electrónico: jamontoya@unisalle.edu.co - ORCID: 0000-0001-7594-3095.

**2.** Ingeniero mecánico, Universidad de los Andes, Bogotá. Magíster en Materiales y Procesos de Manufactura, Universidad Nacional de Colombia. Profesor asistente de la Facultad de Ingeniería, Ingeniería en Automatización, Universidad de La Salle, Bogotá, D.C. Correo electrónico: jorubiano@unisalle.edu.co - ORCID: 0000-0002-6557-3390.

**3.** Ingeniero electrónico, Universidad Manuela Beltrán, Bogotá. Doctor en Ingeniería Mecánica, Universidad Federal de Uberlândia - UFU. Profesor asociado de la Facultad de Ingeniería, Ingeniería en Automatización, Universidad de La Salle, Bogotá, D.C. Correo electrónico: jorangel@unisalle.edu.co - ORCID: 0000-0001-7746-8232.

**4.** Ingeniero mecánico, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Doctor en Ingeniería Mecánica, Universidad Federal de Uberlândia - UFU. Profesor asociado de la Facultad de Ingeniería, Ingeniería en Automatización, Universidad de La Salle, Bogotá, D.C. Correo electrónico: pmartin@unisalle.edu.co - ORCID: 0000-0001-6928-9090.



**Palabras clave:** *agricultura de precisión, aplicación homogénea, fumigación, plaguicidas, sistema automático, sistema hidráulico.*

## **ABSTRACT**

**An automatic pesticide application** system was developed for rose crops, in search of a more uniform application to obtain a better result of the treatment on the crop and with a faster application speed compared with traditional manual methods, by risks that imply for the health of the operators. Additionally, with the automatic system a more rational use of the applied chemical products is achieved, contributing to reduce the adverse effects on the environment. This mobile system located in a greenhouse can be used, both manually and automatically; with different speeds, to apply in a single pass the pesticide specified by the responsible personnel. The system developed for its versatility can also be used for irrigation or fertigation applications as a complement to the work required on the crop. Finally, it was found that this system travels the ship in less time, than required by the operators assigned to the work.

**Keywords:** *precision farming, uniform application, spraying, pesticides, automatic system, hydraulic system.*

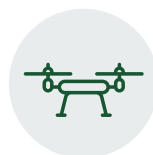


# Introducción

La demanda creciente de alimentos en el mundo hace necesario el aumento significativo de la producción agrícola. Por esa razón, es preciso incrementar la eficiencia de los procesos de plantación, recolección y producción por metro cuadrado. Este escenario ha promovido la automatización de las labores agrícolas debido a la escasez de mano de obra calificada y a la falta de producción tecnificada, especialmente en Colombia, donde la producción agrícola se lleva a cabo en alto porcentaje a nivel familiar, de forma manual y en pequeñas áreas de producción rural de manera tradicional.

En agricultura intensiva se busca obtener el máximo beneficio con el mínimo costo, mejor uso de los recursos y con la mínima intervención posible del suelo y el medio ambiente. Para lograrlo se requiere la aplicación de nuevas tecnologías para planeación, producción y gestión automática de cultivos, lo que actualmente se conoce como agricultura de precisión (Blackmore, 2007). Esta agricultura permite obtener el máximo potencial del suelo por hectárea, con menor uso de abonos, menor degradación del suelo y mayor rendimiento; usa equipos automáticos con sensores (Vellidis *et al.*, 2008), sistemas de detección (Bakker *et al.*, 2008), sistemas de posicionamiento global (GPS) (García-Pérez *et al.*, 2008) y sistemas de información geográfica (GIS) (Godoy *et al.*, 2010), en aplicaciones robóticas para siembra (Leemans y Destain, 2007), dosificación o aplicación de fertilizantes, recolección de cosecha, irrigación y desmalezado (Loghavi y Behzadi, 2008), entre otros. Estos sistemas están basados en tecnologías según las condiciones físicas, químicas y geográficas, con trayectorias de desplazamiento optimizadas por computador (Pajares *et al.*, 2008), que facilitan un mejor aprovechamiento del área, mayor productividad y con dosificación variable de fertilizantes en forma localizada. Hoy en día, la robótica también se enfoca en el desarrollo de vehículos automáticos (Thueer *et al.*, 2006) y sistemas aplicados en el campo (Martín, 2013).

Para el desarrollo del sistema fueron consultados antecedentes sobre el diseño de sistemas de aspersión y aplicación



**Se consultaron sistemas de aspersión de plaguicidas como el sistema de microaspersión de agua, que aumenta la uniformidad de aplicación mediante un mecanismo con desplazamiento a diferentes presiones de la bomba.**





La exposición a plaguicidas es un problema de salud pública, de donde surge la necesidad de implementar un sistema automático de aplicación, con el fin de reducir el impacto negativo que genera sobre los operarios.

de plaguicidas, y se evaluaron diferentes alternativas de construcción. Dentro de las alternativas documentadas, se muestra un sistema de microaspersión de agua (Mendoza *et al.*, 2010), que reduce la mano de obra y aumenta la uniformidad de aplicación mediante un mecanismo automatizado de desplazamiento frontal con desplazamiento satisfactorio a diferentes presiones de la bomba. Existen aplicaciones de robots móviles como el autónomo, para aplicaciones en invernadero con sensores ultrasónicos y de orientación, que navega por los pasillos del invernadero (Masoudi *et al.*, 2011), o el robot para la aplicación de plaguicidas en invernadero de tipo modular, que aplica correctamente los plaguicidas sin dejar evidencia de exceso sobre las plantas del invernadero, aunque no se puede determinar la uniformidad de la aplicación (Sammons *et al.*, 2005). De igual manera, se encuentran desarrollos para optimizar la navegación de los robots móviles agrícolas en invernaderos mediante un sensor para retroalimentación del sistema de control y facilitar el desplazamiento a través de los pasillos (González *et al.*, 2009). También se han llevado a cabo estudios para evaluar combinaciones específicas de boquillas a diferentes presiones: un ensayo para aplicaciones en cobertura total (dirigida a los tres tercios del cultivo), y otro para aplicaciones dirigidas al tercio superior (cobertura a flor). Se usó papel hidrosensible (wsp) para determinar los diferentes aspectos relevantes, como promedio de cobertura, coeficiente de variación y volumen de aplicación (Beltrán *et al.*, 1994).

Existen igualmente estudios basados en la seguridad y salud de los operarios encargados de la aplicación de plaguicidas, relacionados con enfermedades y con las altas temperaturas de exposición que genera el traje de protección que deben utilizar. En este sentido, Rowe *et al.* (2000) utilizaron un sistema de aspersión automatizado con un sistema de aplicación fija a diferentes presiones de trabajo de la bomba, con el objeto de hacer la aplicación sin la presencia del operario. En un estudio realizado por Asocolflores (2003) sobre los posibles problemas físicos y de salud a los que se encuentran sometidos los operarios por el uso intensivo de los plaguicidas (en el que participaron 850 personas, 34,8 % hombres y

65,2 % mujeres), se ponen de relieve acciones preventivas para mejorar la seguridad del operario. Finalmente, se evidencian aplicaciones modernas más tecnológicas con vehículos automáticos (Thueer *et al.*, 2006), y sistemas específicos para aplicación de fertilizantes o plaguicidas (Martín, 2013).

Actualmente, en Colombia, la exposición a plaguicidas se ha convertido en un problema de salud pública debido al incremento de la demanda de estos productos, lo cual ha ocasionado impacto negativo en la salud de la población y en el ambiente. De allí surge la necesidad de diseñar y construir un sistema automático de aplicación de plaguicidas, con el fin de reducir el impacto negativo que tienen los plaguicidas sobre los operarios que desempeñan esta tarea, proporcionar una aplicación con mayor uniformidad, reducir los tiempos de reentrada al cultivo y cubrir la demanda de mano de obra que se genera en esta actividad, además de prevenir desperdicio de productos aplicados y reducir los costos de su aplicación.

Luego de un análisis de estas aplicaciones, se desarrolló un *sistema aéreo automático* que se mueve dentro de un invernadero para la aplicación de plaguicidas sobre el cultivo mediante un sistema de aspersión. El sistema fue diseñado y construido sobre una estructura mecánica de soporte independiente de la estructura del invernadero sobre la cual se mueve, mediante un sistema elevado de rieles paralelos a lo largo de cada nave. Para realizar la aspersión, se montan sobre la estructura móvil la cantidad de aguilones necesarios suspendidos en el aire, de tal forma que la aplicación se realiza sobre todas las plantas en forma simultánea en una sola pasada. Este sistema permite hacer la aplicación tanto en forma manual como automática, y en uno, dos o los tres tercios, con respecto a la altura de las plantas, combinado con la posibilidad de inclinación de los aspersores según las necesidades y la fase fenológica de las plantas.





## 5.1 Materiales y métodos

Para desarrollar el sistema, se comenzó por el estudio de las propiedades y características del cultivo de rosa, y se investigó sobre algunos de los productos químicos empleados en el tratamiento de enfermedades que afectan los cultivos de flores en invernadero. Para ello, se tomaron en consideración nombre, presentación, características de aplicación, plaga objetivo, dosis de aplicación (volumen /ha), periodo de carencia (PC) y periodo de reentrada (PR), así como características de frecuencia y época de aplicación, compatibilidad y fitotoxicidad.

Con esta información general, se pasó a evaluar las posibles formas de aplicación de plaguicidas. Se plantearon y evaluaron alternativas para la metodología de aplicación y para el sistema general, teniendo en cuenta componentes mecánicos, electrónicos y de control requeridos para realizar la aplicación del plaguicida. Las metodologías consideradas fueron: (i) por cada nave, (ii) por cada cama o (iii) para cierto número de camas.

La evaluación se basó en el recorrido, tiempo de aplicación, peso en movimiento, número de boquillas, equipos requeridos y complejidad de la construcción. De acuerdo con lo anterior, la metodología más apropiada es la *aplicación por nave*, porque permite hacer la aplicación de forma simultánea a todas las camas de la nave, reduciendo el número de recorridos por aplicación.

Teniendo definida la metodología, se analizaron las alternativas del sistema de aplicación, las cuales consideran:

- 1) Diseños de *robots móviles*, que se desplazan sobre cualquier terreno mediante ruedas, orugas o patas (Masoudi *et al.*, 2011). El robot generalmente lleva a bordo los componentes para la aplicación de plaguicidas, como tanque, filtros, manómetros, reguladores de presión, válvulas de paso, manguera, bomba, boquillas, entre otros.
- 2) *Sistemas suspendidos, aéreos o de carro suspendido*, que consisten en una barra suspendida por encima de las plantas, la cual lleva las boquillas de aspersión o de

tratamientos fitosanitarios. Un sistema de rieles colocados a lo largo del cultivo permite que la barra con las boquillas pueda desplazarse accionada por un motor que es controlado por medio del autómata.

- 3) *Robots cartesianos*, cuyos tres ejes principales de control son lineales (se mueven en línea recta en lugar de rotar) y forman ángulos rectos unos respecto de los otros para hacer el cubrimiento del área con combinación de movimientos perpendiculares en dos direcciones y una posición vertical fija o ajustable.
- 4) *Carro de aspersión móvil*, que utiliza una barra suspendida por encima de las plantas y lleva dispuestas las boquillas de aspersión o de tratamientos fitosanitarios; la barra se desplaza linealmente haciendo la aplicación simultánea. E incluso,
- 5) *Tractores modificados*, que contienen un juego de boquillas que son transportadas sobre una estructura haciendo la aplicación durante el movimiento del tractor. Están diseñados especialmente para aplicar al follaje de la planta en cultivos específicos.

173

### 5.1.1 Definición estructural del sistema para aplicación de plaguicidas

Las alternativas fueron evaluadas y se seleccionó la que mejor cumplió con los requerimientos del proyecto, como reducción en el tiempo de aplicación tradicional, uniformidad en la aplicación, posibilidad de seleccionar las zonas de aplicación de plaguicidas sobre las plantas, según una escala que consiste en: (1) no deseable, (3) poco deseable y (5) muy deseable, como se muestra en la tabla 5.1. Estos valores ponderados con indicadores de implementación, costo y funcionalidad permitieron seleccionar la alternativa de *sistema de carro de aspersión suspendido*, que obtuvo el mayor puntaje (31 puntos).

Como resultado de esa evaluación, se estableció una metodología de aplicación semiestacionaria en donde se posiciona el sistema de bombeo en un punto fijo dentro o fuera



Se seleccionó la alternativa que mejor cumplió con requerimientos como reducción en el tiempo y uniformidad en la aplicación, y posibilidad de seleccionar las zonas de aplicación de plaguicidas sobre las plantas.



del invernadero y la estructura del carro de aspersión suspendido que se desplaza por la parte superior del cultivo, aplicando plaguicida a cinco camas simultáneamente, por medio de boquillas situadas de forma vertical; se abre así la posibilidad de realizar aplicaciones a diferentes alturas del cultivo mediante electroválvulas. En la figura 5.1 se observa el bosquejo del sistema por diseñar.

➔ **Tabla 5.1** Evaluación de alternativas para el sistema estructural para la aplicación de plaguicidas, según los tipos de sistemas de aplicación analizados.

	ROBOT MÓVIL	CARRO DE ASPERSIÓN SUSPENDIDO	ROBOT CARTESIANO	CARRO DE ASPERSIÓN MÓVIL	TRACTOR CON BOQUILLAS HORIZONTALES
Condiciones en invernadero	1	5	3	1	1
Facilidad de montaje	3	3	3	1	1
Costo	5	3	3	3	1
Velocidad de operación	1	5	1	1	3
Vida útil	1	5	3	5	3
Manejo de manguera	1	5	1	5	3
Uniformidad de aplicación	1	5	5	5	3
TOTAL	13	31	19	21	15

➔ **Figura 5.1** Diseño general del carro de aspersión semiestacionario suspendido para la aplicación de agroquímicos.



Vista isométrica

Vista frontal

El sistema de carro de aspersión suspendido está conformado por los subsistemas que se describen a continuación.

#### 5.1.1.1 Estructura mecánica de soporte

La estructura debe tener capacidad de carga del carro, boquillas y aguilones, actuadores y transmisiones mecánicas. Se descartó la posibilidad de utilizar la estructura del invernadero, por estar diseñada para soportar el peso del plástico de la cubierta y las corrientes de aire; por tanto, se diseñó una estructura mecánica independiente que soporte el carro de aspersión con todos los componentes mecánicos e hidráulicos.

#### 5.1.1.2 Estructura de desplazamiento con carro de aspersión

Soporta la tubería y accesorios del sistema hidráulico (aguilones y boquillas del sistema de bombeo), para desplazarlos a lo largo del invernadero. El sistema se debe desplazar sobre la estructura de soporte por medio de un actuador eléctrico conectado a una transmisión mecánica de cadenas, piñones y ruedas. Debe contar con un sistema de control para la activación del motor en una u otra dirección, apertura y cierre de las electroválvulas hidráulicas y cambios de velocidad según los requerimientos del cultivo.

#### 5.1.1.3 Sistema hidráulico de bombeo

Se encarga de impulsar la mezcla de plaguicidas desde el tanque de preparación y almacenamiento hasta las boquillas, donde se hace la aplicación por aspersión del plaguicida sobre el cultivo. Está compuesto por una bomba, filtros, manómetro, regulador de presión, tuberías, acoples y racores, mangueras, electroválvulas, distribuidor y aguilón con boquillas. Además, requiere de un sistema para soportar y desplazar la manguera a lo largo del invernadero.

#### 5.1.1.4 Sistema de control de actuadores

Es el encargado de activar y desactivar los actuadores eléctricos e hidráulicos del sistema. Adicionalmente, interactúa con el usuario, permitiéndole seleccionar parámetros como: sección por aplicar, cantidad de tercios por asperjar,



El sistema de control activa y desactiva los actuadores eléctricos e hidráulicos, interactúa con el usuario, permite elegir sección y cantidad de tercios por asperjar, dirección y velocidad de desplazamiento del carro.





El diseño considera  
geometría,  
dimensiones,  
materiales,  
torques, potencias,  
velocidades  
de operación,  
elementos de  
fijación y ubicación  
de cada uno  
para garantizar  
modularidad,  
trabajo adecuado  
y sincronía de  
operación.

dirección de desplazamiento del carro y velocidad de desplazamiento, según el volumen que se debe aplicar. Cuenta con controladores electrónicos, sensores, módulos de entradas y salidas digitales y análogas, protecciones eléctricas, contactores, variadores de frecuencia e interfaz de usuario.

### 5.1.2 Criterios de diseño de cada subsistema de aplicación de plaguicidas

Una vez definidas las funciones de cada subsistema, se establecieron los *criterios de diseño* para que cada subsistema realice la función dentro de todo el sistema, con el fin de obtener un conjunto armónico que se ajuste a los criterios de diseño establecidos y asegure el buen funcionamiento de este.

#### 5.1.2.1 Criterios de la estructura mecánica de soporte

Área del cultivo  $70 \times 9$  m, correspondiente a una nave de las cinco asignadas al proyecto; dos secciones por nave con separación longitudinal de 7 m (dos sectores); diez camas por nave con ancho de 1 m y separación de 0,5 m entre ellas, correspondiente a cinco camas por cada sección; 2 m de altura máxima de las plantas, y 7,4 m de altura del invernadero, según información suministrada por Agrosavia.

#### 5.1.2.2 Criterios de la estructura de desplazamiento del carro de aspersión

Longitud por recorrer en el cultivo: 35 m, correspondiente a una sección (media nave); 9 m de luz entre apoyos del sistema de aspersión de plaguicidas; aproximadamente 200 kg de peso del sistema con todos los elementos; velocidad máxima de desplazamiento:  $0,2$  a  $0,5 \text{ m s}^{-1}$ ; soporte independiente para conductores eléctricos y soporte independiente para manguera hidráulica.

#### 5.1.2.3 Criterios del sistema hidráulico de bombeo

Presión de trabajo: 250 a 300 psi; 50 m de longitud de la manguera que se va a utilizar por sector; diámetros de la manguera:  $\frac{1}{2}$ ",  $\frac{3}{4}$ "; presiones en boquillas: 180 psi; seis agui-

lones, uno para cada camino entre camas; doce boquillas por aguilón, seis para cada lado de cama, controladas por electroválvulas; tipos de boquillas por ensayar: TP8001 VK Teejet; C-35 Yamaho; TXVK-6 Teejet cono hueco y BD8001 Magnojet; volumen por aplicar: 8 L/cama, y forma de presentación de la mezcla de plaguicidas: líquido previamente preparado.

#### 5.1.2.4 Criterios del sistema de control de actuadores

Variables por considerar: velocidad, posición inicial y final del carro de aspersión; funcionamiento en modo automático y manual; fácil interacción con el usuario; uso de elementos comerciales; alimentación eléctrica a 110 V; protecciones eléctricas de los elementos instalados; grado de protección para ambiente con alta humedad y material en suspensión, y calibre de conductores de acuerdo con la corriente de consumo.

### 5.1.3 Desarrollo del diseño conceptual de la solución

177

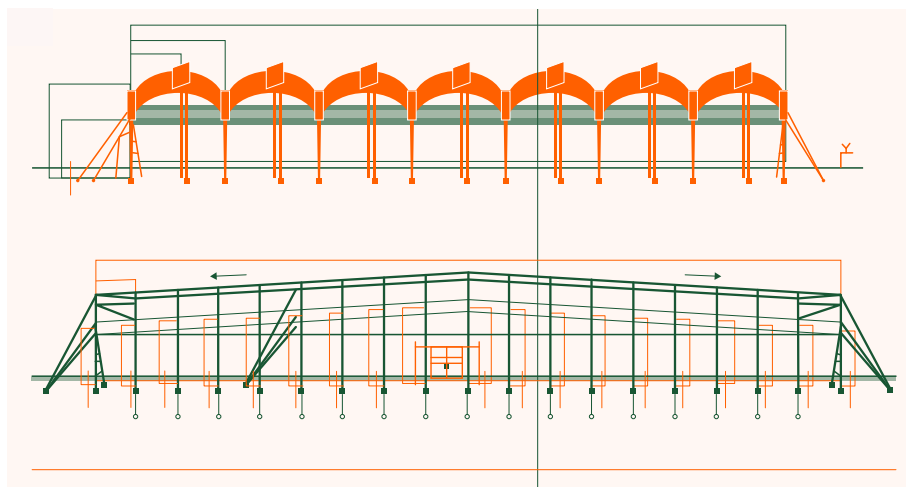
Para el *diseño de detalle del sistema de aplicación de plaguicidas* se determinaron la geometría, dimensiones, materiales, torques, potencias, velocidades de operación, elementos de fijación y ubicación de cada uno de los subsistemas que garanticen su modularidad, trabajo adecuado y sincronía durante la operación general. El proceso fue llevado a cabo en tres etapas: diseño de los subsistemas componentes, construcción de los subsistemas componentes y validación y optimización de funcionamiento del sistema.

#### 5.1.3.1 Diseño de los subsistemas componentes

Para el diseño del sistema se partió de las dimensiones de un invernadero ubicado en las instalaciones de Agrosavia, en el Centro de Investigación Tibaitatá, en la vía Bogotá - Mosquera, Cundinamarca. A partir de ellas, fue diseñada la estructura principal de soporte independiente, ya que se desconocía la capacidad de soporte de carga del invernadero para ensayos; pero el sistema puede ser adaptado para fi-

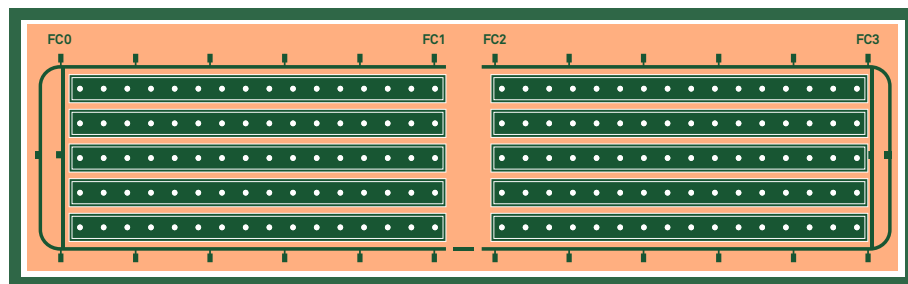
➔ **Figura 5.2 A.** Dimensiones generales del invernadero (Centro de investigaciones Tibaitatá, Agrosavia); **B.** Configuración de la nave para aplicación de plaguicidas.

A



B

178



jación a la estructura de nuevas naves. En la figura 5.2A se muestran las dimensiones generales tenidas en cuenta a partir del invernadero disponible.

En el invernadero se sembraron plantas de rosa en cinco naves, y una de ellas fue destinada para el sistema de aplicación de plaguicidas, como se observa en la figura 5.2B. La nave está conformada por dos secciones: FC0-FC1 y FC2-FC3, con una separación de 7 m, correspondiente a un camino para el transporte de flores cosechadas empleando un cable vía. En cada sección hay cinco camas con longitud de 30 m, ancho de 1 m y separación entre camas de 0,5 m. Con base

en la información de los planos, se definieron las dimensiones del sistema (largo: 30 m; ancho: 9 m y alto: 2,5 m).

Posteriormente, se desarrolló el diseño de ingeniería, apoyado en herramientas de *software* de ingeniería asistida por computador (CAE). Para la estructura mecánica de soporte, se emplearon columnas con una carga aplicada como columna excéntrica en perfil rectangular comercial de 120 × 60 mm. En *software* SolidWorks se realizó el estudio estructural para las columnas y vigas, las cuales sirvieron como base para el movimiento del carro de aspersión, teniendo en cuenta que este tiene un peso máximo de 200 kg. En la figura 5.3A se observa el análisis de resistencia bajo carga mediante los esfuerzos de Von Mises para las columnas, y en la figura 5.3B, los desplazamientos correspondientes para las mismas columnas. En la figura 5.3C, el análisis de los esfuerzos de Von Mises para la viga que se desplaza con los aguillones de aspersión, y en la figura 5.3D, los desplazamientos para la misma viga.

De acuerdo con la escala de colores de la figura 5.3, el esfuerzo máximo encontrado en las columnas y vigas es de 34,8 MPa y 29,2 MPa, respectivamente; el factor de seguridad obtenido es de 7 en la columna y 8,5 en las vigas, con lo cual se corrobora la confiabilidad del diseño.

#### 5.1.3.1.1 Estructura de desplazamiento del carro de aspersión

Luego del análisis sobre las diferentes estructuras metálicas, se selecciona un elemento tipo cercha muy ligera y que soporte altas cargas aplicadas. En este caso se realizó el diseño utilizando tres tramos de 8 m de tubo de 1" calibre 14 y 60 tramos de aproximadamente 3 m de varilla con diámetro de 9 mm. Esta cercha cuenta con la platina central de 3,2 × 2,5 m, para el posicionamiento del motorreductor, encargado de generar el movimiento del carro de aspersión.

#### 5.1.3.1.2 Cálculo de la potencia del motor para el carro de aspersión

Para el cálculo de la potencia del motor se consideraron los componentes que conforman el carro de desplazamiento



El diseño se desarrolló con herramientas de *software* de ingeniería asistida por computador – CAE; y el estudio estructural de columnas y vigas, que son la base del movimiento del carro de aspersión, con el *software* SolidWorks.

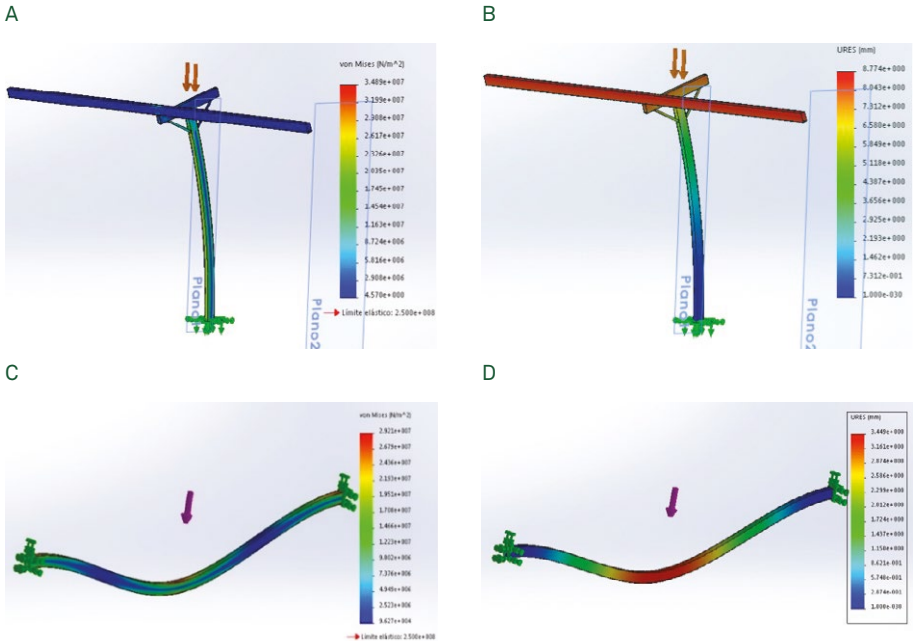




con sus pesos respectivos, los cuales suman un total de 160 kg distribuidos en los dos carros laterales. Eso corresponde a cargas de 800 N sobre cada uno de los apoyos. Tomando como base ruedas de 4" de diámetro, un coeficiente de rodadura ( $C_r$ ) de 0,00984, se calculó una fuerza para mover el sistema de 15,74 N con dos ruedas en cada extremo del carro. Para una velocidad de desplazamiento de  $0,5 \text{ m s}^{-1}$  se requieren 7,87 W de potencia y con factor de seguridad de 5, eficiencia eléctrica de 42 % por ser un motor pequeño y de baja potencia y eficiencia mecánica de 42 % por ser una transmisión por fricción; se obtiene una potencia real de 223,52 W (0,3 Hp).

Con base en los cálculos, se selecciona un motor trifásico WEG W22 de carcasa de hierro gris Standard Efficiency IE. 1800 rpm,  $\frac{1}{2}$  Hp, 220/440 V, con caja reductora SITI Ref. 60 a  $1$  a  $90^\circ$  y eje hueco de diámetro 25 mm.

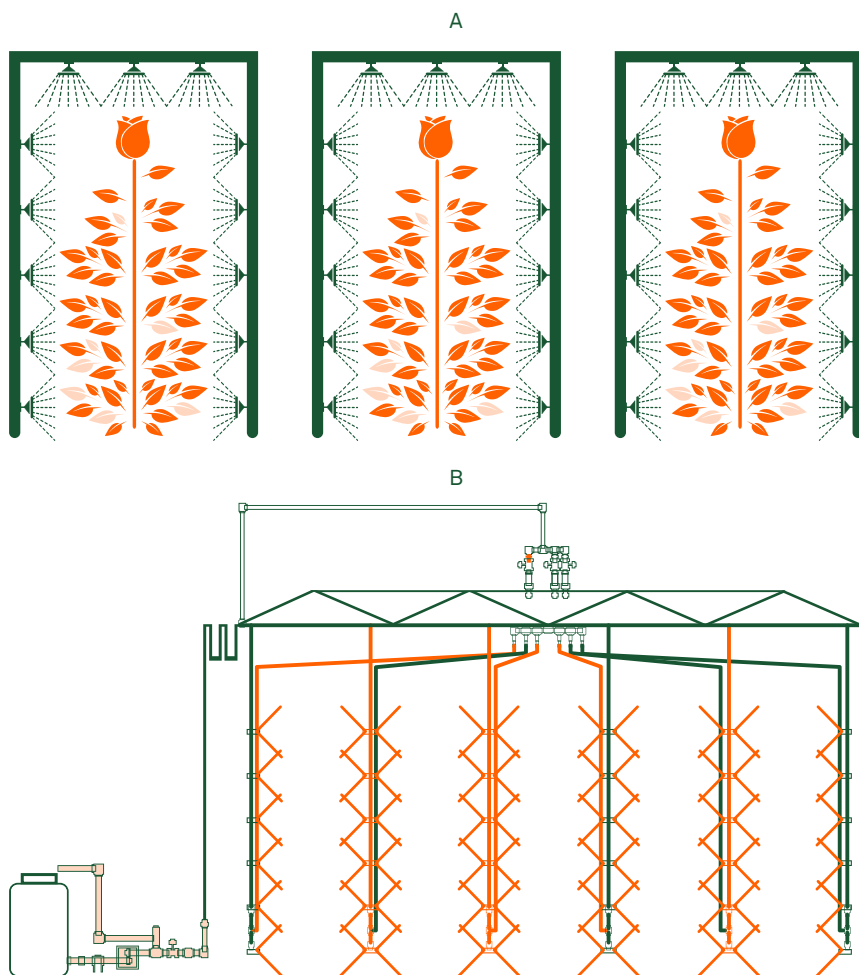
➔ **Figura 5.3** Cálculos para las columnas y viga de movimiento de la estructura soporte del sistema. Para las columnas: **A.** Cálculos de esfuerzos de Von Mises; **B.** Cálculos de desplazamientos. Para la viga de movimiento: **C.** Cálculos de esfuerzos de Von Mises; **D.** Cálculos de desplazamientos.



### 5.1.3.1.3 Cálculo de potencia de la bomba hidráulica

Una vez definido el sistema estructural, se diseñó el sistema hidráulico de distribución del plaguicida y los aguilones (conjunto de barra de soporte y boquillas de aspersión), teniendo en cuenta la versatilidad requerida en el posicionamiento y la orientación de los aspersores para las diferentes aplicaciones sobre las plantas, según las necesidades de aspersión. En la figura 5.4A se muestra el diseño inicial de los

➔ **Figura 5.4** A. Diseño general de los aguilones para el cubrimiento total de las plantas en la aplicación del agroquímico; B. Sistema hidráulico de distribución del agroquímico desde el depósito de preparación de la solución por asperjar.





El sistema hidráulico de distribución del plaguicida y los aguilones consideran la versatilidad requerida en el posicionamiento y la orientación de los aspersores para las diferentes aplicaciones sobre las plantas.

aguilones buscando el cubrimiento total de las plantas en la aplicación del producto, y en la figura 5.4B, el diseño general del sistema hidráulico de aplicación, desde el depósito donde se prepara la solución para aplicación.

La bomba hidráulica se encarga de incrementar la energía de la mezcla de plaguicidas, aumentando la presión y velocidad del fluido para ser distribuido por toda la red hacia la planta. Para dimensionar el sistema, se seleccionaron primero las boquillas de aspersión por utilizar, de acuerdo con la tabla 5.3, con cuatro referencias diferentes para determinar cuál presenta mejores resultados de aplicación. Se incluye referencia, ángulo de aspersión y caudal suministrado según ficha técnica.

*Cálculo de caudal del sistema:* a partir del caudal suministrado por boquilla a la presión establecida por el fabricante según la tabla 5.3, a una presión de trabajo de 150 psi y determinando una cantidad total de 60 boquillas requeridas para la aplicación simultánea de plaguicida. Para la media nave, es decir, por cada sector de aplicación son cinco camas, cada una asperjada simultáneamente por ambos lados, con dos boquillas por cada tercio de la planta, para seis boquillas por lado o doce boquillas por cama.

Para calcular la potencia de la bomba en su condición crítica de suministro de fluido a las 60 boquillas al tiempo, se consideró un caudal máximo de  $1,2 \text{ L min}^{-1}$ , con una presión antes de la salida de la boquilla de 150 psi para boquillas Yamaho C-35, para un caudal total por suministrar de  $1,2 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

*Longitud máxima de manguera por aguilon:* la longitud máxima requerida se calcula teniendo como base el aguilon más alejado del carro de aspersión respecto a la ubicación de

➔ **Tabla 5.3** Especificaciones de las boquillas por emplear.

REFERENCIA	ÁNGULO DE ASPERSIÓN	CAUDAL (L min <sup>-1</sup> ) A 150 PSI
Yamaho C-35	80	1,2
Teejet TP8001VK	80	0,71
BD8001 Magnajet	80	0,69
Roja TXVK-6 Teejet	80	0,68

la bomba y longitud de la cama basados en la figura 5.5A. Como resultado, se tienen las distancias presentadas en la tabla 5.4.

Con base en estas longitudes, se calculó una longitud de manguera por aguilón de 33,75 m, y se estimó un total de manguera de aproximadamente 200 m. Para calcular las pérdidas, se determinaron las longitudes equivalentes ( $L_e$ ) por boquilla (0,22 m) y por electroválvula (1 m), y mediante la ecuación de energía de Bernoulli para un sistema hidráulico, se calculó el área de la manguera requerida con el caudal conocido.

La distribución del fluido de trabajo es la siguiente: la bomba impulsa el fluido a través de una manguera de alimentación de 8,5 mm de diámetro hasta llegar a un distribuidor que alimenta dos boquillas en cada tercio, por medio de mangueras de 6 mm de diámetro, controlando la salida con una electroválvula por cada tercio; es decir, por cada dos boquillas.

Con una presión de salida de 150 psi, el área de las mangueras de 6 mm y 8,5 mm de diámetro y el caudal, se determinó una velocidad del fluido ( $V$ ) de  $0,707 \text{ m s}^{-1}$ . Se calcularon las pérdidas en la manguera de distribución (hr) a partir de la ecuación de Bernoulli, con un coeficiente de viscosidad del fluido obtenido del diagrama de Moody ( $\lambda = 0,016$ ), viscosidad cinemática  $\nu = 1,307 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  y número de Reynolds  $Re = 1,4 \times 10^5$ . Asumiendo tubería lisa, se obtienen pérdidas  $hr = 0,215 \text{ m}$  por boquilla y pérdidas totales de 13 m, aproximadamente.

*Potencia hidráulica:* considerando la cabeza de la bomba, equivalente a las pérdidas que debe superar la bomba, para

➔ **Tabla 5.4** Longitud de manguera requerida para las boquillas.

BOQUILLA	LONGITUD DE MANGUERA (m)
1	4,75
2	5,10
3	5,45
4	5,80
5	6,15
6	6,50



La secuencia de funcionamiento se desarrolló con un diagrama lógico de secuencia de operaciones, que incluye secuencia de encendido, modo de operación, selección del sector trabajo y ajuste de parámetros de aplicación.

lograr el tamaño de partícula requerido (13  $\mu$ m), se calcula una potencia de 2,6 W por boquilla. Como son 60 boquillas, la potencia neta es de 156 W. Con un factor de seguridad de 5 debido a obstrucciones en las mangueras, variación de curvatura en las mismas, entre otras, eficiencia térmica del motor de la bomba del 25 % y eficiencia mecánica de los sistemas en movimiento de 80 %, se llega a una potencia real de 3900 W (5,3 Hp), que es la potencia mínima requerida por el equipo para la aspersión de los plaguicidas.

Se selecciona una motobomba con las especificaciones mínimas obtenidas que suministre el caudal requerido de  $1,2 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , equivalente a 72 L  $\text{min}^{-1}$ . La bomba comercial seleccionada es LS 558150 con motor Honda de 15 Hp, caudal de 95 a 133 L  $\text{min}^{-1}$  y presión máxima de 750 psi que cumple con las especificaciones solicitadas.

*Sistema porta-manguera:* tiene como función principal permitir que la manguera de alimentación se desplace adecuadamente a lo largo de la nave del cultivo y facilitar el alojamiento de la manguera cuando el sistema no está en funcionamiento. Se evaluaron sistemas de soporte con cadenas, con polea, suspendido en el aire y de manguera retráctil, y se seleccionó un *sistema de transporte suspendido*, porque no requiere de un sistema motorizado. La manguera se mueve al tiempo que el carro de aspersión, pues forma espiras que van modificando su distanciamiento por efecto del halado del carro cuando se está realizando la aplicación de plaguicidas. La figura 5.5B muestra el resultado de los ensayos realizados para ver el movimiento de esta con las argollas sobre el tubo guía. La manguera se desplaza de manera uniforme por el tubo, con una distancia entre ondas de hasta 0,60 m aproximadamente.

#### 5.1.3.1.4 Sistema de control de actuadores

También se calcularon los sistemas eléctricos de potencia con sus sistemas de protección, los sistemas mecánicos de transmisión de movimiento a partir de motorreductores y los sistemas electrónicos y de control, necesarios para el funcionamiento automático del sistema.

Para definir la secuencia de funcionamiento del sistema de aplicación de plaguicidas, se desarrolló el diagrama lógico de secuencia de operaciones (Grafcet), que incluye la secuencia de encendido, el modo de operación: manual o automático, la selección del sector trabajo: sector A o B, y el ajuste de parámetros de aplicación (tercios por asperjar, velocidad de operación).

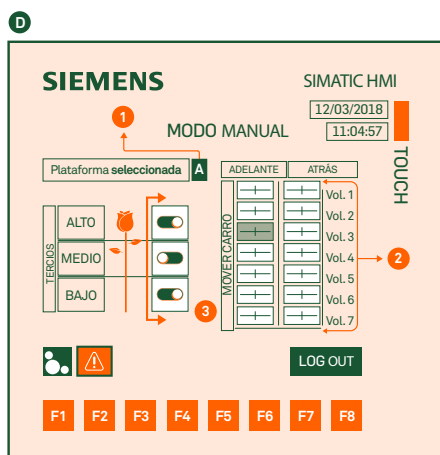
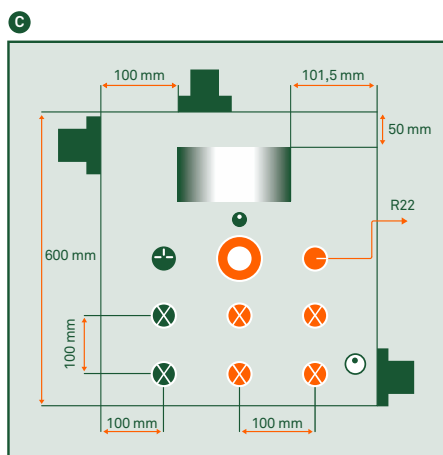
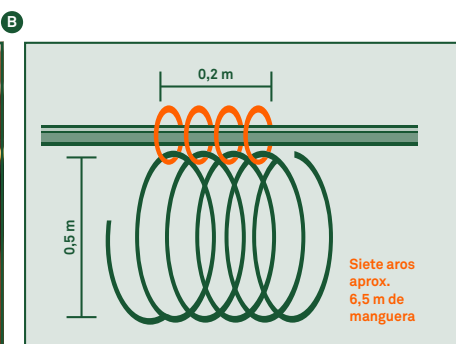
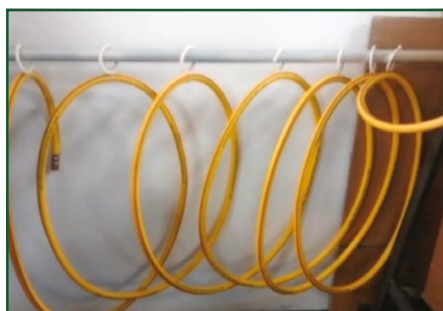
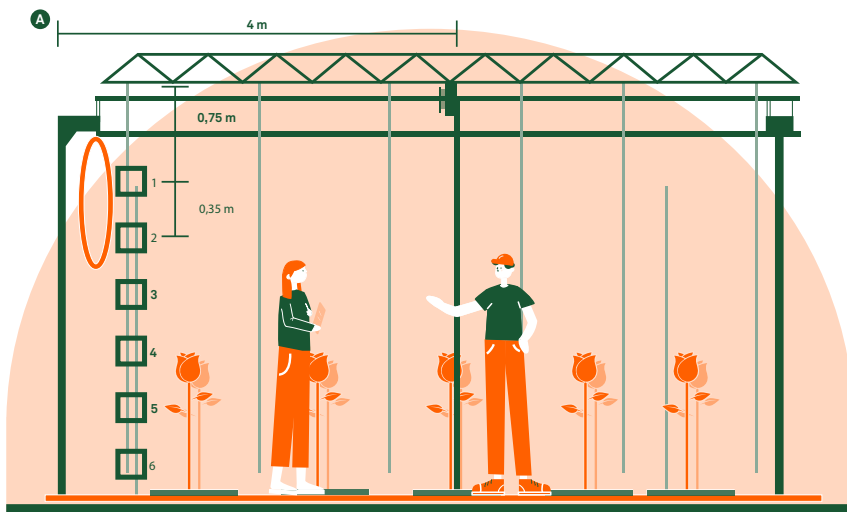
El sistema fue diseñado para ser manipulado por el operador a través del tablero de mando, con una interfaz digital programada en conexión con el controlador principal del sistema. En la figura 5.5C se muestra el tablero de control del sistema, y en la figura 5.5D la pantalla de operación en modo manual donde se identifican: 1) selección de plataforma por activar, A o B; 2) velocidades de aplicación, y 3) activación de tercios de aplicación.

### **5.1.3.2 Construcción del sistema automático de aplicación de plaguicidas en el invernadero**

Una vez aprobados los diseños, se desarrolló inicialmente el proceso de construcción de la estructura principal del sistema, como se muestra en la figura 5.6A. En la figura 5.6B se observa el prototipo de aguilón diseñado con el conjunto de aspersores instalados. Luego del montaje de las columnas y de la alineación de los rieles de desplazamiento, fue construido y montado el carro principal de soporte de los aguilonos sobre el sistema móvil (figura 5.6C). Finalmente, se procedió al montaje de todo el sistema hidráulico de distribución con las mangueras soportadas sobre la estructura principal (figura 5.6D) y el sistema de distribución y conexión hidráulica y eléctrica para las electroválvulas y los aspersores de los aguilonos (figura 5.6E).

Para poner en funcionamiento el sistema, se dispuso todo el cableado y la conexión eléctrica desde los tableros de mando y control. En la figura 5.7A se muestra el tablero de potencia para los motores del carro de desplazamiento, y en la 5.7B el tablero del sistema de control independiente.

➔ **Figura 5.5** A. Especificación de longitud de manguera; B. Distribución flexible de manguera para aplicación de plaguicidas; C. Diseño del tablero de control; D. Pantalla de operación del sistema en modo manual.





➔ **Figura 5.6** **A.** Detalle de construcción de la estructura principal de soporte del sistema en el invernadero; **B.** Detalle de construcción del aguilón con el conjunto de aspersores instalados; **C.** Carro principal de soporte de los aguilones montado sobre la estructura de desplazamiento; **D.** Instalación de las mangueras y el sistema hidráulico de distribución sobre la estructura principal de soporte; **E.** Montaje del sistema de distribución y conexión hidráulica y eléctrica para las electroválvulas y los aspersores de los aguilones.

A



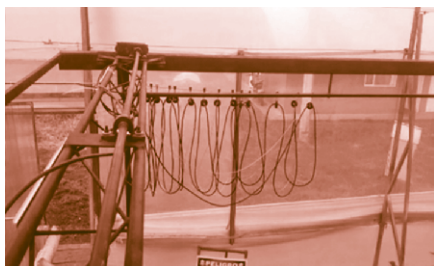
B



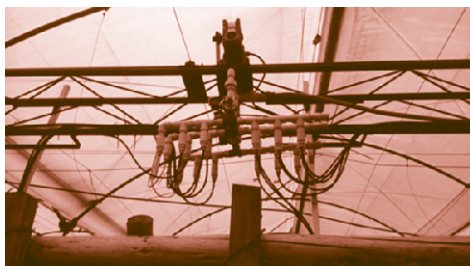
C



D



E





### 5.1.3.3 Validación y optimización de funcionamiento del sistema

Durante el proceso de construcción, todos los subsistemas y componentes fueron probados primero en forma independiente y, después, instalados y probados como parte integral del equipo. Por ejemplo, los aspersores, una vez contruidos, primero fueron probados y ajustados en forma independiente y luego montados sobre la estructura en conjunto, como se muestra en las figuras 5.7C y 5.7D.

La optimización de los parámetros de configuración del sistema de aplicación se realizó después de una serie de ensayos preliminares, llevados a cabo con un diseño factorial  $4 \times 3 \times 2$  en bloques, donde los factores involucrados fueron: tipo de boquilla, velocidad de la cercha y presión manométrica de inyección al sistema de aplicación.

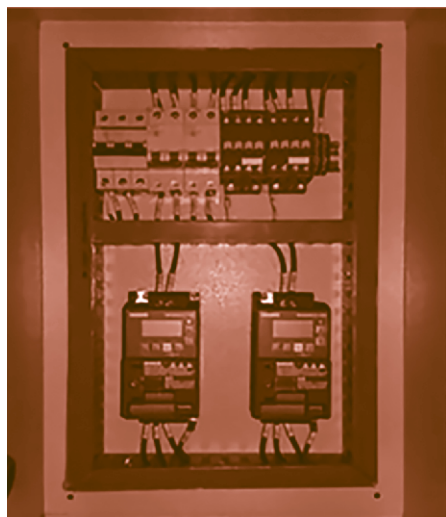
## 5.2 Resultados relevantes

Una vez terminado el proyecto de investigación, se obtuvieron los siguientes resultados:

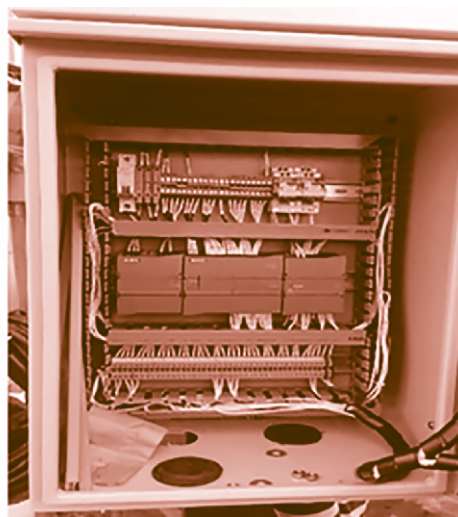
- Diseño y construcción de un sistema automático de aplicación de plaguicidas en invernadero que reduce el contacto del producto químico con el operario, y, por ende, disminuye los riesgos de contaminación para las personas que realizan este trabajo.
- Menor consumo de plaguicidas con dosificación controlada y aplicación homogénea sobre el cultivo, cumpliendo con los requerimientos de Florverde versión 7.0.
- Reducción del tiempo de aplicación de plaguicidas en el cultivo, por aplicarse simultáneamente en varias camas o líneas de cultivo.
- Cubrimiento homogéneo sobre el cultivo con velocidades de aplicación ajustables a los requerimientos.
- Facilidad de orientación y posicionamiento de las boquillas acorde con los requerimientos del cultivo y del producto por aplicar.

➔ **Figura 5.7** **A.** Tablero de conexión de los sistemas de potencia; **B.** Tablero de control de movimiento; **C.** Prueba y puesta a punto del funcionamiento de los agujones con los aspersores instalados; **D.** Pruebas de funcionamiento del sistema de aspersión completo en forma manual y automática.

A



B



C



D



- El sistema tiene facilidad de manejo a partir de una interfaz digital, la cual permite seleccionar el tercio de la planta, la velocidad de avance y el volumen de aplicación.
- Posibilidad de uso para aplicación sobre uno, dos o los tres tercios, de acuerdo con las necesidades y la altura de las plantas.
- Apropiación del conocimiento tecnológico para el desarrollo del sector a través de la formación de recurso humano, con las capacidades requeridas para la floricultura.

## 5.3 Conclusiones

A partir de la prueba y puesta en funcionamiento del sistema, y una vez llevadas a cabo las pruebas de aplicación experimental, se puede concluir lo siguiente:

- Se hizo el diseño y la construcción del primer sistema automático de aplicación de plaguicidas con tecnología y recurso humano disponible en el país, lo que permite ser adaptado fácilmente a las necesidades de los productores locales.
- El sistema automático de aplicación genera un menor impacto sobre el medio ambiente, por las características de los productos involucrados, gracias a un mejor control en variables como velocidad, presión y caudal en la aspersión de los productos.
- El posicionamiento y ajuste de las boquillas sobre los aguilonos se llevan a cabo de acuerdo con la altura de las plantas sobre las cuales se desea hacer la aplicación, con la posibilidad de aplicar sobre uno, dos o tres tercios de la planta, según las necesidades.
- El sistema es capaz de hacer el cubrimiento completo de un sector (media nave) en una sola pasada durante un periodo de 30 a 90 segundos, dependiendo del producto fitosanitario y el volumen de aplicación.

## Agradecimientos

Los investigadores del Grupo AVARC de la Universidad de La Salle agradecen a las instituciones participantes: Asocolflores, Ceniflores, Universidad Nacional de Colombia, Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Agrosavia, y en especial a la Universidad de La Salle y a la Gobernación de Cundinamarca, por la posibilidad de participar como parte del Convenio Especial de Cooperación n.º 014 de 2015 para su ejecución en el marco del proyecto “Fortalecimiento de la competitividad del sector floricultor colombiano mediante el uso de ciencia, tecnología e innovación aplicadas en Cundinamarca”.

## Conflictos de interés y contribuciones de autoría

El manuscrito fue preparado y revisado de manera conjunta por los autores, quienes declaran no tener ningún conflicto de interés que comprometa la validez de los resultados aquí presentados.

191

## Referencias

- Asocolflores. Oxfam Internacional. 2003. Estudio sobre las condiciones laborales de los trabajadores del sector floricultor en Colombia. Disponible en: Industria de la floricultura, <https://studylib.es/doc/118938/industria-de-la-floricultura>; consulta: enero de 2020.
- Bakker, T., H. Wouters, K. van Asselt, J. Bontsema, L. Tang, J. Muller y G. van Straten, 2008. A vision based row detection system for sugar beet. *Comput. Electron. Agr.* 60:87-95.
- Beltrán, Y.R., C.A. Rodríguez y F.R. Leiva. 1994. Evaluación de técnicas de aplicación de plaguicidas en un cultivo de estatice (*Limonium sinuatum* Mill), en la Sabana de Bogotá. *Agron. Colomb.* 11(1):73-82.



- Blackmore, S. 2007. Agricultura de precisión-AP. *Revista Nacional de Agricultura*. 949:20-28.
- García-Pérez, L., M. García-Alegre, A. Ribeiro y D. Guinea. 2008. An agent of behavior architecture for unmanned control of a farming vehicle. *Comput. Electron. Agr.* 60(1):39-48. DOI: 10.1016/j.compag.2007.06.004.
- Godoy, E.P., R.A. Tabile, R.R.D. Pereira, G.T. Tangerino, A.J.V. Porto y R.Y. Inamasu. 2010. Design and implementation of an electronic architecture for an agricultural mobile robot. *Rev. Bras. Eng. Agr. Amb.* 14(11):1240-1247. DOI: 10.1590/S1415-43662010001100015.
- González R., F. Rodríguez, J. Sanchez-Hermosilla y J.G. Donaire. 2009. Navigation techniques for mobile robots in greenhouses. *Appl. Eng. Agric.* 25(2):153-165. DOI: 10.13031/2013.26324.
- Leemans, V. y M.-F. Destain. 2007. A computer-vision based precision seed drill guidance assistance. *Comput. Electron. Agr.* 59(1-2):1-12. DOI: 10.1016/j.compag.2007.04.003.
- Loghavi, M. y B. Behzadi M. 2008. Development of a target oriented weed control system. *Comput. Electron. Agr.* 63(2):112-118. DOI: 10.1016/j.compag.2008.01.020.
- Martín, P. 2013. Distribuição inteligente de adubos químicos via GPS com tecnologia para pequenos produtores. Tesis de doctorado. Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Federal de Uberlandia, Uberlandia, Brasil.
- Masoudi H., R. Alimardani, M. Omid, S.S. Mohtasebi y N. Noguchi. 2011. An autonomous mobile robot for greenhouse applications. *CIGR International Symposium 2011*. Tokyo. Disponible en: [https://rms.scu.ac.ir/Files/Articles/Conferences/Abstract/CIGR%202011\\_Published%20paper.pdf2012124201750796.pdf](https://rms.scu.ac.ir/Files/Articles/Conferences/Abstract/CIGR%202011_Published%20paper.pdf2012124201750796.pdf); consulta: enero de 2020.
- Mendoza, J.C., L. Gruber, C. Torrealba y J.G. Lugo. 2010. Diseño, construcción y evaluación de un equipo automatizado para riego por microaspersión. *Bioagro* 22(3):235-238. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/857/85717010010.pdf>.

- Pajares, G., J.J. Ruz, P. Lanillos, M. Guijarro, J.M de la Cruz y M. Santos. 2008. Generación de trayectorias y toma de decisiones para UAV's. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*. 5(1):83-92. DOI: 10.1016/S1697-7912(08)70125-0.
- Rowe, D.E., S. Malone y Q.L. Yates. 2000. Automated greenhouse spray system for increased safety and flexibility. *Crop Sci.* 40(4):1176-1179. DOI: 10.2135/cropsci2000.4041176x.
- Sammons, P.J., T. Furukawa y A. Bulgin. 2005. Autonomous pesticide spraying robot for use in a greenhouse. The University of New South Wales. Canberra. Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/Phil\\_Sammons/publication/320716348\\_Autonomous\\_Pesticide\\_Spraying\\_Robot\\_for\\_use\\_in\\_a\\_Greenhouse/links/59f738dc0f7e9b553ebd6011/Autonomous-Pesticide-Spraying-Robot-for-use-in-a-Greenhouse.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Phil_Sammons/publication/320716348_Autonomous_Pesticide_Spraying_Robot_for_use_in_a_Greenhouse/links/59f738dc0f7e9b553ebd6011/Autonomous-Pesticide-Spraying-Robot-for-use-in-a-Greenhouse.pdf). Consultada: enero de 2020.
- Thueer, T., A. Krebs y R. Siegwart. 2006. Comprehensive locomotion performance evaluation of all-terrain robots. pp. 4260-4265. En: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems – IROS*. Beijing, China.
- Vellidis, G., M. Tucker, C. Perry, C. Kvien y C. Bednarz. 2008. A real-time wireless smart sensor array for scheduling irrigation. *Comput. Electron. Agr.* 61(1):44-50. DOI: 10.1016/j.compag.2007.05.009.





En flores,  
Calidad, Portafolio y  
Asesoría técnica en campo



Juntos crecemos bien

**AVGUST COLOMBIA S.A.S.**  
Tel: + 57 310 451 3336 • [contacto@avgust.com.co](mailto:contacto@avgust.com.co)  
[www.avgust.com.co](http://www.avgust.com.co) • IG: @avgustcolombia





# 6

## CAPÍTULO



# Efecto de mallas fotoselectivas en la fluctuación poblacional de adultos de mosca blanca en plantas de alstroemeria

Angélica María Pardo Pardo<sup>1</sup>, William Javier Cuervo Bejarano<sup>2</sup>, Ferdy Alfonso Alvarado Montoya<sup>3</sup>, Sandra Esperanza Melo Martínez<sup>4</sup> y Edison Torrado León<sup>5</sup>

## RESUMEN

La alstroemeria es un cultivo de importancia económica para Colombia, y su productividad y calidad son limitadas, entre otras causas, por la incidencia de plagas. La manipulación del ambiente luminoso es una herramienta de control etológico que puede afectar la orientación, desplazamiento y población de los insectos. Existen estudios donde se manipula el ambiente luminoso de los cultivos utilizando mallas fotoselectivas de colores; sin embargo, en el país no hay reportes sobre su uso comercial para el manejo de plagas. Esta investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de mallas fotoselectivas de colores perla y rojo en la fluctuación poblacional de *Trialeurodes vaporariorum* (Westwood) (Hemiptera: Aleyrodidae) en un cultivo de alstroemeria cv. Primadonna,

197

\* Para citar este capítulo: Pardo P., A.M., W.J. Cuervo B., F.A. Alvarado M., S.E. Melo M. y E. Torrado L. 2021. Efecto de mallas fotoselectivas en la fluctuación poblacional de adultos de mosca blanca en plantas de alstroemeria. En: Flórez R., V.J. (ed). Productos relevantes del proyecto Fortalecimiento de la competitividad del sector floricultor colombiano mediante el uso de ciencia, tecnología e innovación aplicadas en Cundinamarca. Bogotá: Editorial Unisalle, Ceniflores. pp. 196-215.

1. Ingeniera en agroecología, Corporación Universitaria Minuto de Dios - UNIMINUTO. Correo electrónico: angemariapa1218@gmail.com - ORCID: 0000-0002-4701-6443.

2. Ingeniero agrónomo y magíster en Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Profesor Corporación Universitaria Minuto de Dios - UNIMINUTO. Correo electrónico: wcuervo@uniminuto.edu - ORCID: 0000-0003-4097-8890.

3. Ingeniero agrónomo y magíster en Desarrollo empresarial agropecuario, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Correo electrónico: faalvaradom@unal.edu.co - ORCID: 0000-0003-0935-5863.

4. Estadística, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Doctora en Estadística, Universidad de Barcelona. Profesora asociada, Departamento de Agronomía, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Correo electrónico: semelom@unal.edu.co - ORCID: 0000-0002-4875-7657.

5. Biólogo y magíster en Ciencias Biológicas, Universidad del Valle. Profesor asociado, Departamento de Agronomía, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Correo electrónico: etorradol@unal.edu.co - ORCID: 0000-0002-0472-4626.



ubicado en Chía, Cundinamarca. El periodo de evaluación fue entre diciembre de 2017 y febrero de 2018, y se evaluaron la transmitancia de las mallas y la reflectancia de hojas, así como el número de adultos de *T. vaporariorum* contados directamente en hojas en cada uno de los tratamientos. Como resultado se encontraron significativamente menos individuos en los tratamientos perla (30 %) y rojo (30 %) con respecto al testigo. En conclusión, el cambio en el ambiente luminoso no solo influye en el crecimiento y desarrollo de las plantas, sino también en el comportamiento de los artrópodos, lo que puede aportar elementos para alternativas de control de plagas basadas en tecnologías sostenibles.

**Palabras clave:** *flor de corte, etología, fotobiología, mosca blanca.*

## ABSTRACT

**Alstroemeria cut flowers market is** economically important for Colombia and its productivity and quality are limited, among others, by the incidence of pests. The manipulation of the light environment is an ethological control tool that can affect the orientation, movement and, population of insects. There are studies where the luminous environment of the crops is manipulated using color photoselective nets, however, in Colombia, there are no reports about their commercial use for pest management. This research aimed to evaluate the effect of pearl and red-colored photoselective nets with shade factors of 30 and 40%, in the population fluctuation of *Trialeurodes vaporariorum* (Westwood) (Hemiptera: Aleyrodidae) in an alstroemeria crop cv. Primadonna, located in Chía, Cundinamarca. The evaluation period was between December 2017 and February 2018, and the nets transmittance and leaves reflectance were evaluated, as well as the number of adults of *T. vaporariorum* counted directly on leaves in each of the treatments. As a result, for the 30 % pearl and 30 % red nets the number of individuals was statistically significantly lower than the control. In conclusion, the change in the light environment not only in-

fluences the growth and development of the plants, but also the behavior of arthropods, which can provide elements for pest control alternatives based on sustainable technologies.

**Keywords:** *cut flowers, ethology, photobiology, whitefly.*



# Introducción

La alstroemeria es el cuarto cultivo ornamental más exportado, después de rosas, claveles y crisantemos, con una participación del 8 %, lo que la posiciona como uno de los cultivos de flores de corte más importante del país (Escobar y Gómez, 2018).

Las pérdidas económicas a causa de plagas y enfermedades en los sistemas productivos de flores del país han tenido impactos considerables en las exportaciones, lo que ha causado preocupación en el sector y una mayor demanda en investigación de este factor limitante. Algunas plagas cuarentenarias relevantes en cultivos de plantas ornamentales son *Frankliniella occidentalis* (Kirk y Terry, 2003), *Tetranychus urticae* (Van Leeuwen *et al.*, 2010), *Copitarsia* sp. (Paz *et al.*, 2007; Venette y Gould, 2006), *Liriomyza* sp. (Weintraub *et al.*, 2017) y *Trialeurodes vaporariorum* (Peña, 2017; Wang *et al.*, 2017; Brown *et al.*, 1995 e ICA, 2018), y entre los virus uno de los más importantes es el virus de la raya necrótica de la alstroemeria (ANSV) (Hassani-Mehraban *et al.*, 2010). Tradicionalmente el manejo de estas plagas y enfermedades se realiza con control químico; sin embargo, se han utilizado estrategias para el manejo integrado de plagas, como el control biológico, el bioquímico y el cultural (Villanueva *et al.*, 2017).

El control etológico es un método de captura de insectos plagas que utiliza feromonas, colores y luz para la atracción o repulsión de artrópodos (Martínez, 2010). La manipulación del ambiente luminoso dentro de un invernadero es posible al emplear materiales que filtren la luz; por ejemplo, el uso de mallas de plástico tejido para cubrir los cultivos y filtrar selectivamente bandas de la radiación solar interceptada, y para transformar la luz directa en luz dispersa (Shahak, 2008; Shahak *et al.*, 2009).

Al optimizar el uso de la radiación solar se pueden promover respuestas fisiológicas que mejoran la calidad y la productividad en cultivos como lechugas (Shahak, 2008; Ben-Yakir *et al.*, 2008), *Pittosporum* sp. (Shahak *et al.*, 2004), manzanas y espinacas (Sivakumar y Jifon, 2018), frutales (Glenn *et al.*, 1999) y otras especies de interés agroindustrial

(Goren *et al.*, 2011; Rajapakse *et al.*, 1999; Márquez-Quiroz *et al.*, 2014 y Bastías, 2012). Adicionalmente, se han reportado efectos en el comportamiento de las plagas al manipular el ambiente lumínico (Koshitaka *et al.*, 2008), como es el caso de cultivos de tomate y pepino donde se redujeron el porcentaje de infestación de trips y, por ende, la incidencia de enfermedades (Ben-Yakir *et al.*, 2008). Rodríguez-Rodríguez *et al.* (2002) demostraron que el uso de mallas fotoselectivas disminuyó la población de adultos de mosca blanca y el porcentaje de infección del virus del rizado amarillo del tomate (TYLCV). Similarmente, Pérez *et al.* (2010) evaluaron el efecto de cuatro mallas utilizadas como cubierta en un cultivo de tomate, y analizaron la incidencia del virus TYLCV producido por *Bemisia tabaci*, en donde la malla más densa redujo los niveles de la plaga y del virus, y mejoró la productividad del cultivo. Ben-Yakir *et al.* (2012a) reportaron que para el control de áfidos y mosca blanca en cultivos de tomate y pimentón se obtuvieron de dos a tres veces menos infestación en los tratamientos con mallas de color amarilla y perla, en comparación con las roja y negra; además, observaron la sensibilidad de la mosca blanca a la luz verde-amarilla (520-540 nm) debido a que induce la llegada y el establecimiento de esta plaga en la planta (Ben-Yakir *et al.*, 2012b; Ben-Yakir *et al.*, 2014; Ben-Yakir *et al.*, 2013; Ben-Yakir *et al.*, 2012a; Bae *et al.*, 2015).

A la fecha, en Colombia no se registran reportes de los efectos de mallas fotoselectivas en las plantas y en el comportamiento de artrópodos de sistemas productivos agrícolas; por tanto, se desarrolló la presente investigación con el fin de determinar el efecto del uso de mallas fotoselectivas en la fluctuación poblacional de mosca blanca (*Trialeurodes vaporariorum* (Westwood), Hemiptera: Aleyrodidae) en plantas de alstroemeria cv. Primadonna, y plantear posibles alternativas basadas en tecnologías sostenibles que mitiguen la incidencia de plagas en los cultivos de flores sembradas bajo cubierta.



Algunas plagas cuarentenarias relevantes en cultivos de plantas ornamentales son *Frankliniella occidentalis*, *Tetranychus urticae*, *Copitarsia* sp., *Liriomyza* sp. y *Trialeurodes vaporariorum*.



## 6.1 Materiales y métodos

### 6.1.1 Área experimental

El estudio se realizó en el Centro de Bio-Sistemas Alberto Lozano Simonelli (CBios) de la Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, ubicado en Chía, Cundinamarca (4°53'N, 74°08'O, 2.579 msnm), en donde se registran promedios de temperatura y humedad relativa de 14 °C y 83 %, respectivamente. Se construyó un invernadero multitúnel de 3025 m<sup>2</sup> en acero galvanizado (ASTMA-653) cuya estructura fue diseñada bajo la norma europea para invernaderos EN 13031. El invernadero consta de cinco naves, de 11 × 55 m cada una, con doble ventilación cenital fija, de las cuales dos se destinaron a la ejecución del ensayo. Se sembraron en suelo rizomas de alstroemeria (*Alstroemeria* spp.) cv. Primadonna (HilverdaKooij, Colombia SAS) con edad promedio de siete semanas. Se establecieron cinco bloques con cinco camas (11 × 1 m) cada uno, y en cada bloque las camas laterales, así como 1 m en los extremos de cada una de las camas correspondieron al efecto borde. La distancia entre camas (caminos) fue de 0,5 m, y en la cama las plantas se sembraron equidistantes a 0,4 m, en doble surco distanciados 0,25 m, para una densidad de 4,9 plantas por m<sup>2</sup>/invernadero y un total de 3400 plantas. El manejo del cultivo se realizó como se suele hacer en los sistemas comerciales del país; sin embargo, con el propósito de evaluar la incidencia de la mosca blanca (*Trialeurodes vaporariorum* (Westwood), Hemiptera: Aleyrodidae) bajo las mallas, fue necesario hacer una exclusión química foliar y edáfica con el insecticida Malathion®, un organofosforado sintético, a una dosis de 1 mL L<sup>-1</sup>, para reducir la población de insectos en el cultivo, principalmente de mosca blanca.

### 6.1.2 Variables medidas

#### 6.1.2.1 Transmitancia y reflectancia

Los cambios en el espectro de luz luego de ser filtrados por las mallas y la reflectancia de las hojas fueron obtenidos

utilizando un espectrómetro con una sensibilidad entre 200 y 1100 nm con resolución de 5 nm (FLAME S-XR1-ES, Ocean Optics Inc., USA) y registrados con el *software* Ocean View 1.6.7. La transmitancia de las mallas se midió al nivel del tercio superior del cultivo, y la reflectancia de hojas se midió, según lo indica Döring y Röhrig (2014), a una distancia de 10 cm en diez hojas por repetición para un total de 30 hojas por tratamiento.

6.1.2.2 Conteo de individuos por monitoreo directo

Para determinar el número de adultos de mosca blanca se tuvo en cuenta lo descrito en Puentes (2015). En las repeticiones de cada tratamiento se observaron tanto el envés como el haz de aproximadamente 300 hojas siguiendo un patrón en zigzag. Se observó el tercio bajo, el tercio medio y el tercio alto de cada planta muestreada, sin considerar las plantas ubicadas en los bordes de cada tratamiento. Este monitoreo se realizó semanalmente durante siete semanas, entre la semana 52 de 2017 y la semana 6 de 2018.

203

6.1.2.3 Temperatura y humedad relativa

La temperatura y la humedad relativa se registraron por medio de un termopar tipo T (cobre-constantán) conectado a un registrador de datos (Cox-Tracer Junior, Escort DLS, Edison, NJ). Se ubicó un termopar en el punto central de cada tratamiento a una altura de 1,6 m del suelo; los termopares se colocaron dentro de cilindros blancos de PVC con el fin de reflejar la luz solar directa. En la tabla 6.1 se muestran los promedios de temperaturas y humedad registrados en el periodo de evaluación.

➔ **Tabla 6.1** Valores medios de humedad relativa y temperatura en el periodo del 14 de diciembre de 2017 al 7 de febrero de 2018, en cada uno de los tratamientos evaluados.

VARIABLE	TRATAMIENTO				
	P30	P40	R30	R40	T
Humedad relativa (%)	88,35	91,95	91,11	86,17	86,19
Temperatura (°C)	14,08	14,64	14,55	14,40	14,69



### 6.1.3 Diseño experimental y análisis de datos

En la semana 37 después de siembra se instalaron mallas fotoselectivas de tejido tipo Raschel de colores perla (P) y rojo (R) (ChromatiNet® Pearl y Chromatinet® Red, Ginegar Plastic Products Ltd.) con porcentajes de sombrío en el rango de la radiación fotosintéticamente activa, de 30 y 40 %, que corresponden a tamaños de orificio de 3 × 2 mm y 6 × 8 mm, respectivamente. Estos cuatro tipos de mallas (P30, P40, R30 y R40) se compararon con un testigo comercial sin malla (T). Las mallas se instalaron a una altura aproximada de 3 m sobre el nivel del suelo. Los tratamientos fueron asignados aleatoriamente a las unidades experimentales, y cada tratamiento estaba conformado por tres camas (repeticiones). Los datos de conteo se ajustaron a un modelo lineal generalizado (Smith y Faddy, 2016; O'Hara y Kotze, 2010; Sileshi, 2006) y se utilizó el *software* estadístico R 3.4.4 (R Core Team, R Foundation for Statistical Computing, Viena, Austria).

## 6.2 Resultados relevantes



### 6.2.1 Transmitancia y reflectancia

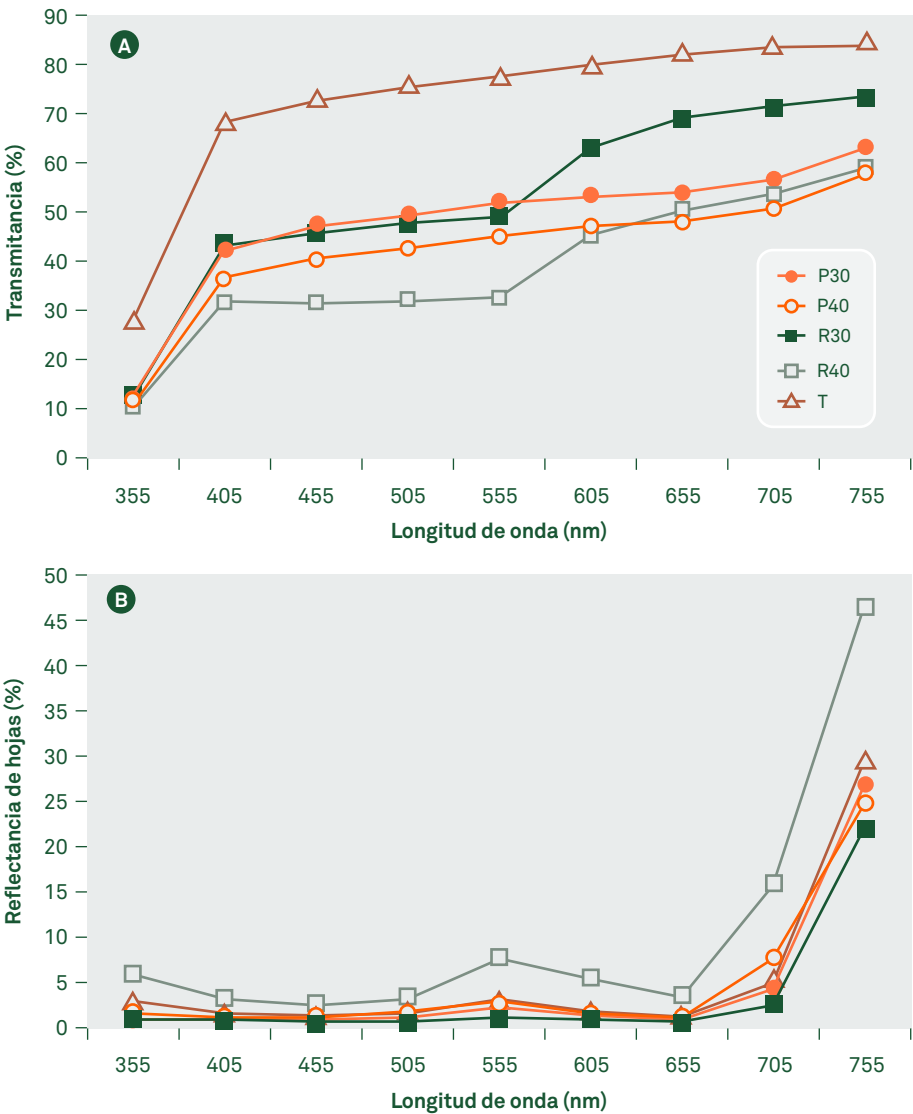
En el rango 565 a 800 nm, la malla R30 reduce la transmitancia en aproximadamente el 10 %, mientras que las mallas R40, P40 y P30 la reducen en alrededor del 20 %.

En general, con respecto al espectro transmitido por la película plástica del invernadero, las mallas disminuyen la transmitancia de la región UV-A (350-400 nm) en cerca del 20 %. Entre los 400 a 565 nm, se presentaron reducciones de alrededor del 40 % para P30, del 30 % para P40 y para R30 y R40, cerca del 20 %. En el rango 565 a 800 nm, la malla R30 reduce la transmitancia en aproximadamente el 10 %, mientras que las mallas R40, P40 y P30 la reducen en alrededor del 20 % (figura 6.1A).

En la figura 6.1B se ilustra la reflectancia de hojas, en donde, entre los 355 y 755 nm, la reflectancia de la malla R40 es mayor con respecto a los demás tratamientos,

principalmente en el rango de 525 a 575 nm, región que comprende la longitud de onda del color amarillo.

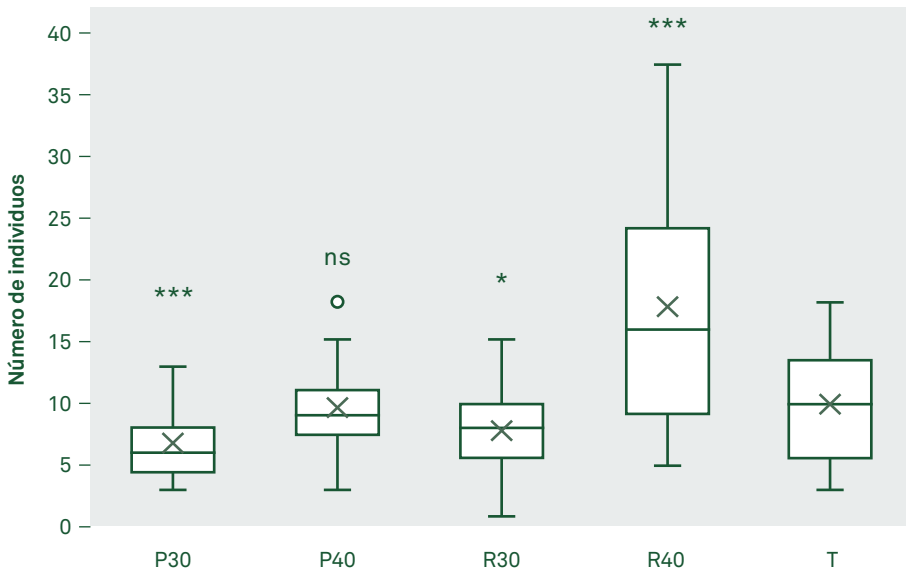
➔ **Figura 6.1** Espectros de transmitancia de las mallas fotoselectivas y reflectancia de hojas de alstroemeria entre los 355 y 755 nm, medidos en el área experimental del CBios. **A.** Registro del espectro transmitido por las mallas de color perla con 30 y 40 % de sombrío (P30 y P40, respectivamente) y de color rojo con 30 y 40 % de sombrío (R30 y R40, respectivamente) sobre la radiación fotosintéticamente activa, en comparación con el tratamiento sin malla (T); **B.** Registro del espectro de reflectancia de las hojas de alstroemeria por cada uno de los tratamientos en mención.



### 6.2.2 Conteo de individuos por muestreo directo

Los datos de los muestreos de individuos de adultos de mosca blanca se ajustaron a un modelo binomial negativo con función de enlace logarítmica, debido a la presencia de sobredispersión en el modelo y basados en la prueba de Vuong, que sugiere que el modelo binomial negativo presenta una mejora significativa con respecto a un modelo Poisson estándar (Ismail y Aziz Jemain, 2007). Se evidencian diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos P30 y R30 con relación al testigo, con valores 0,68 y 0,78 veces menor, respectivamente, y el tratamiento R40 1,77 veces mayor con respecto al testigo (figura 6.2).

➔ **Figura 6.2** Número total de adultos de mosca blanca encontrados en el conteo por monitoreo directo en el cultivo de alstroemeria sometido a los tratamientos con mallas fotoselectivas de color perla con 30 y 40 % de sombrío (P30 y P40, respectivamente) y de color rojo con 30 y 40 % de sombrío (R30 y R40, respectivamente), con respecto al tratamiento testigo, sin malla (T).  
\*\*\*  $P < 0,001$ ; \*\*  $P < 0,01$ ; \*  $P < 0,05$



## 6.3 Discusión

La producción y calidad de flores se benefician al manipular el ambiente lumínico. Un ejemplo de lo anterior lo encontraron Hlatshwayo y Wahome (2010) en clavel, al obtener incrementos en la longitud de los tallos utilizando un factor de sombrío del 20 %; en plantas de *Pittosporum variegatum*, Oren-Shamir *et al.* (2001) manipularon el crecimiento de brotes laterales con mallas de colores rojo y gris.

Las respuestas de la mosca blanca a la luz están influenciadas por factores como calidad y cantidad de la luz, el tiempo de exposición, la dirección y contraste del color, dependiendo de la fuente de luz, si es bombilla LED o placa reflectora (Johansen *et al.*, 2010). En este experimento, bajo la malla R40 el mayor porcentaje de reflectancia en hojas se encontró entre 530 y 570 nm, lo que explicaría por qué se tuvo mayor población de adultos de mosca blanca en este tratamiento, en razón a que fue más atrayente para este insecto debido a la luz reflejada (Cárdenas y Corredor, 2009; Antignus *et al.*, 2001). Estos resultados confirmarían que el comportamiento de la mosca blanca responde a las longitudes de onda entre 500 a 590 nm (verde-amarillo) (Ben-Yakir *et al.*, 2012b; Ben-Yakir *et al.*, 2014; Ben-Yakir *et al.*, 2013; Ben-Yakir *et al.*, 2012a; Esker *et al.*, 2004).

En los tratamientos P30 y R30 se encontró la menor población de mosca blanca, lo cual es razonable, debido a que la luz reflejada por las hojas de las plantas bajo estas mallas fue menor que el 5 % en la longitud de onda del color amarillo. Este resultado es similar al hallado por Ben-Yakir *et al.* (2012a), quienes reportan que la disminución de la población de mosca blanca en los cultivos de pimienta y tomate se debió a la alta reflexión que se presentó en los tratamientos con malla de color perla de 35 % de sombrío.

R30 es el tratamiento con los mejores resultados con respecto a productividad y calidad, y de menor incidencia de mosca blanca. No solo la población de individuos adultos fue significativamente menor que el testigo, sino que la productividad y la calidad de alstroemeria cv. Primadonna fueron mejores, al obtenerse mayor cantidad de tallos cosechados

207



En los tratamientos P30 y R30 se encontró la menor población de mosca blanca debido a que la luz reflejada por las hojas de las plantas bajo estas mallas fue menor que el 5 % en la longitud de onda del color amarillo.





**En los tratamientos con mallas perla y rojo, con 30 % de sombrío, se obtuvo un número menor de adultos de mosca blanca; hallazgo que pone de manifiesto el potencial uso de mallas fotoselectivas para el control de plagas.**

con mejores grados de calidad (datos no mostrados). La implementación de las mallas fotoselectivas mantiene las plantas en temperaturas más bajas en condiciones de alta radiación, en comparación con aquellas bajo la influencia de la película plástica del invernadero, lo que reduce la transpiración y el posible estrés por saturación de luz (Gu *et al.*, 2002).

Estos hallazgos obtenidos en la investigación propenden por el desarrollo de técnicas sostenibles, ya que las manipulaciones ópticas pueden ser parte de los programas de manejo integrado de plagas (MIP) en campo abierto o para cultivos protegidos. Adicionalmente, al disminuir el uso de productos de síntesis química en el cultivo, se bajan costos en la operación del sistema productivo y se favorece el medio ambiente y al personal de cultivo al no exponerlos a moléculas contaminantes, base para estos productos de síntesis química (Ballaré *et al.*, 2012; Mazza *et al.*, 2012).

## 6.4 Conclusión

En los tratamientos con las mallas de color perla y rojo, ambas con 30 % de sombrío, se encontró un número significativamente menor de individuos adultos de mosca blanca, mientras que en el tratamiento con la malla de color rojo al 40 % de sombrío se evidenció una considerablemente mayor población de este insecto, en comparación con el tratamiento testigo, sin malla. Estos hallazgos ponen de manifiesto el potencial uso de mallas fotoselectivas para el control etológico de plagas.

## Agradecimientos

Al proyecto “Fortalecimiento de la competitividad del sector floricultor colombiano mediante el uso de ciencia, tecnología e innovación aplicadas en Cundinamarca”, financiado por el Sistema General de Regalías, y ejecutado en alianza entre la Universidad de La Salle, la Gobernación de Cundinamarca, la Asociación Colombiana de Exportado-

res de Flores (Asocolflores), el Centro de Innovación de la Floricultura Colombiana (Ceniflores), la Universidad Nacional de Colombia y la Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. A los ingenieros Alejandro Ávila Ruiz y Julián Díaz del Instituto Entoma, por los aportes al documento y en la colaboración para la identificación de la especie de mosca blanca encontrada en el cultivo de alstroemeria cv. Primadonna.

## Conflictos de interés y contribuciones de autoría

El manuscrito fue preparado y revisado de manera conjunta por los autores, quienes declaran no tener ningún conflicto de interés que comprometa la validez de los resultados aquí presentados.

## Referencias

- Antignus, Y., D. Nestel, S. Cohen y M. Lapidot. 2001. Ultraviolet deficient greenhouse environment affects whitefly attraction and flight-behavior. *J. Environ. Entom.* 30(2): 394-399. DOI: 10.1603/0046-225X-30.2.394.
- Bae, S.D., H.J. Kim, N.Y. Yoon, Y.H. Lee, I.H. Park, H.W. Kang y B.P. Mainali. 2015. Yellow sticky card offers composite attractiveness to western flower thrips and greenhouse whitefly. *J. Entomol. Zool. Stud.* 3(4):110-113.
- Ballaré, C.L., C.A. Mazza, A.T. Austin y R. Pierik. 2012. Canopy light and plant health. *Plant Physiol.* 160(1):145-155. DOI: 10.1104/pp.112.200733.
- Bastías, R. 2012. Investigan uso de mallas de colores para mejorar la sustentabilidad de la producción en huertos de manzanas. En: Facultad de Agronomía, Universidad de Concepción. Chile. Disponible en: <http://www.agronomiaudec.cl/investigan-uso-de-mallas-de-colores-para-mejorar-la-sustentabilidad-de-la-produccion-en-huertos-de-manzanas/>; consultado: enero de 2018.



- Ben-Yakir, D., M. Hadar, Y. Offir, M. Chen y M. Tregerman. 2008. Protecting crops from pests using OptiNet® screens and ChromatiNet® shading nets. *Acta Hort.* 770:205-212. DOI: 10.17660/ActaHortic.2008.770.24.
- Ben-Yakir, D., Y. Antignus, Y. Offir y Y. Shahak. 2012a. Colored shading nets impede insect invasion and decrease the incidences of insect-transmitted viral diseases in vegetable crops. *Entomol. Exp. Appl.* 144(3): 249-257. DOI: 10.1111/j.1570-7458.2012.01293.x.
- Ben-Yakir, D., Y. Antignus, Y. Offir y Y. Shahak. 2012b. Optical manipulations of insect pests for protecting agricultural crops. *Acta Hortic.* 956: 609-615.
- Ben-Yakir, D., Y. Antignus, Y. Offir y Y. Shahak. 2013. Optical manipulations: an advance approach for reducing sucking insect pests. pp. 249-267. En: Ishaaya I., S. Palli y A. Horowitz (eds.). *Advanced technologies for managing insect pests*. 1ª ed. Dordrecht: Springer. 328p. DOI: 10.1007/978-94-007-4497-4\_12.
- Ben-Yakir, D., Y. Antignus, Y. Offir y Y. Shahak. 2014. Photo-selective nets and screens can reduce insect pests and diseases in agricultural crops. *Acta Hortic.* 1015:95-102. DOI: 10.17660/ActaHortic.2014.1015.10.
- Brown, J.K., D.R. Frohlich y R.C. Rosell. 1995. The sweetpotato or silverleaf whiteflies: Biotypes of *Bemisia tabaci* or a species complex? *Annu. Rev. Entomol.* 40(1):511-34. DOI: 10.1146/annurev.en.40.010195.002455.
- Cárdenas, E. y D. Corredor. 2009. Preferencia de los trips (*Thysanoptera: Thripidae*) hacia trampas de colores en un invernadero de flores de la Sabana de Bogotá. *Agron. Colomb.* 6(1-2):78-81.
- Döring, T.F. y K. Röhrig. 2014. Behavioural response of winged aphids to visual contrasts in the field. Faculty of Life Sciences, Department of Agronomy and Crop Science, Albrecht-Thaer-Institute of Agricultural and Horticultural Sciences, Humboldt University Berlin, Berlin, Germany. DOI: 10.1111/aab.12273.
- Escobar, Y. y L. Gómez. 2018. Análisis de la exportación de flores colombianas durante el período de 2012-2017. Te-

- sis de pregrado. Contaduría Pública, Universidad Cooperativa de Colombia, Santiago de Cali, Colombia.
- Esker, P.D., J. Obrycki y F.W. Nutter. 2004. Trap height and orientation of yellow sticky traps affect capture of *Chaetocnema pulicaria* (Coleoptera: Chrysomelidae). J. Econ. Entomol. 97(1):145-149. DOI: 10.1603/0022-0493-97.1.145.
- Glenn, D., G. Puterka, T. Vanderzwet, R. Byers y C. Fieldhake. 1999. Hydrophobic particle films: a new paradigm for suppression of arthropod pests and plant diseases. J. Econ. Entomol. 92(4):759-771. DOI: 10.1093/jee/92.4.759.
- Goren, A., S. Alkalia-Tuvia, Y. Perzelan, Z. Aharon y E. Fallik. 2011. Photosensitive shade nets reduce postharvest decay development in pepper fruits. Adv. Hort. Sci. 25(1):26-31. DOI: 10.13128/ahs-12781.
- Gu, L., D. Baldocchi, S. Verma, T. Black, T. Vesala, E. Falge y P. Dowty. 2002. Advantages of diffuse radiation for terrestrial ecosystem productivity. J. Geophys. Res., 107(D6): ACL 2-1 ACL 2-23. DOI: 10.1029/2001JD001242.
- Hassani-Mehraban, A., M. Botermans, J. Verhoeven, E. Meekes, J. Saaijer, D. Peters, R. Goldbach y R. Kormelink. 2010. A distinct tospovirus causing necrotic streak on *Alstroemeria* sp. in Colombia. Arch. Virol. 155(3):423-428. DOI: 10.1007/s00705-010-0590-7.
- Hlatshwayo, M. y P. Wahome. 2010. Effects of shading on growth, flowering and cut flower quality in carnation (*Dianthus caryophyllus*). J. Agric. Soc. Sci. 6(2): 34-38.
- Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). 2018. El ICA supervisa la calidad fitosanitaria de cerca de 600 millones de tallos de flores enviados a los Estados Unidos para la fiesta de San Valentín. Disponible en: <http://www.agronet.gov.co/Noticias/Paginas/httpswww-ica-gov-co-Noticiasica-flores-colombianas-sanvalentin.aspx.aspx>; consulta: julio de 2018.
- Ismail, N. y A. Aziz Jemain. 2007. Handling overdispersion with negative binomial and generalized poisson regression models. Casualty Actuarial Society Forum.





- Disponible en: <https://www.casact.org/pubs/forum/07wforum/07w109.pdf>; consulta: diciembre de 2019.
- Johansen, N.S., I. Vänninen, D.M. Pinto, A.I. Nissinen y L. Shipp. 2010. In the light of new greenhouse technologies: 2. Direct effects of artificial lighting on arthropods and integrated pest management in greenhouse crops. *Ann. Appl. Biol.* 159(1):1-27. DOI: 10.1111/j.1744-7348.2011.00483.x.
- Kirk, W. y L. Terry. 2003. The spread of the western flower thrips *Frankliniella occidentalis* (Pergande). *Agric. Forest Entomol.* 5(4):301-310. DOI: 10.1046/j.1461-9563.2003.00192.x.
- Koshitaka, H., M. Kinoshita, M. Vorobyev y K. Arikawa. 2008. Tetrachromacy in a butterfly that has eight varieties of spectral receptors. *Proc. Biol. Sci.* 275(1637):947-54. DOI: 10.1098/rspb.2007.1614.
- Márquez-Quiroz, C., V. Robledo-Torres, A. Benavides-Mendoza, M.E. Vázquez-Badillo, E. Cruz-Lázaro, M.A. Estrada-Botello y S.T. López-Espinosa. 2014. Uso de mallas sombra: una alternativa para la producción de tomate cherry. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios.* 1(2):175-180.
- Martínez, N. 2010. Manejo integrado de plagas: una solución a la contaminación ambiental. *Epidemiología en acción. Comunidad y Salud.* 8(1):73-82.
- Mazza, C.A., P.I. Giménez, A.G. Kantolic y C.L. Ballaré. 2012. Beneficial effects of solar UV-B radiation on soybean yield mediated by reduced insect herbivory under field conditions. *Physiol. Plant.* 143(3):3017-315. DOI: 10.1111/j.1399-3054.2012.01661.x.
- O'Hara, R.B. y D.J. Kotze. 2010. Do not log-transform count data. *Methods Ecol. Evol.* 1:118-122. DOI: 10.1111/j.2041-210X.2010.00021.
- Oren-Shamir, M., E. Gussakovsky, E. Shpiegel, A. Nissim-Levi, K. Ratner, R. Ovadia y Y. Giller. 2001. Coloured shade nets can improve the yield and quality of green decorative branches of *Pittosporum variegatum*. *J. Hortic. Sci. Biotech.* 76(3):353-361. DOI: 10.1080/14620316.2001.11511377.

- Paz, H., M. Rodríguez, D. González, C. Galarza y E. Torrado-León. 2007. Control de *Copitarsia decolora* en cultivos de flores mediante la emisión de frecuencias. Revista de Ingeniería Universidad de los Andes. 27:17-26. DOI: 10.16924%2Friua.v0i27.276.
- Peña, Y. 2017. Evaluación de la eficiencia de *Eriopsis* sp. como depredador de áfidos plaga en la producción de Alstroemeria. Tesis de pregrado. Facultad de Ingeniería, Universidad de Ciencias Aplicadas Ambientales (UDCA), Bogotá, Colombia.
- Pérez, J., J. López, J.C. Gázquez, E. Baeza, D. Meca y C. Pérez. 2010. Tecnologías de invernaderos y control biológico. Técnicas de cultivo que afectan a la viabilidad del control biológico en los invernaderos de Almería. Cuadernos de Estudios Agroalimentarios (CEA). 01:07-26.
- Puentes G., C.D. 2015. Prácticas de monitoreo de plagas y enfermedades en finca productora de Alstroemeria. Tesis de pregrado. Facultad de Ciencias Básicas y Aplicadas. Universidad Militar Nueva Granada, Cajicá, Colombia.
- Rajapakse, N.C., R. Young, M. McMahon y R. Oi. 1999. Plant height control by photoselective filters: current status and future prospects. Horttechnology. 9(4):618-624. DOI: 10.21273/horttech.9.4.618.
- Rodríguez-Rodríguez, M.P., V. Aparicio-Salmerón, J. Ticó, F. Figuls, y M.M. García-García. 2002. Eficacia de la malla fotoselectiva BioNet en la prevención de la mosca blanca y TYLCV en cultivos protegidos. Phytoma España: La revista profesional de sanidad vegetal. 135:87-92.
- Shahak, Y. 2008. Photo-selective netting for improved performance of horticultural crops. A review of ornamental and vegetable studies carried out in Israel. Acta Hort. 770: 161-168. DOI: 10.17660 / ActaHortic.2008.770.18.
- Shahak, Y., R. Ganelevin, E.E. Gussakovsky, M. Oren-Shamir, E. Gal, M. Díaz, Á.J. Callejón, F. Camacho y E.J. Fernández. 2004. Efectos de la modificación de la calidad de luz mediante mallas de sombreo fotoselectivas (Chromatinet) sobre la fisiología, mejora del rendimiento y calidad de cosechas. pp. 117-137. Producción hortícola



- y seguridad alimentaria. Almería: Cámara de Comercio de Almería - Universidad de Almería. 431p.
- Shahak, Y., D. Ben-Yakir, Y. Offir, H. Yehezkel, A. Goren y E. Fallik. 2009. Photosensitive shade netting for improving vegetable productivity, pre- and post-harvest quality and pest control. ASHS Annual Conference 2009.
- Sileshi, G.W. 2006. Selecting the right statistical model for analysis of insect count data by information theoretic measures. Bull. Entomol. Res. 96(5):479-488. DOI: 10.1079/BER2006449.
- Sivakumar, D. y J. Jifon. 2018. Influence of photosensitive shade netting on postharvest quality of vegetables. pp. 121-138. En: Siddiqui, M. (ed.). Preharvest modulation of postharvest fruit and vegetable quality, 1.<sup>a</sup> ed., Academic Press, Londres. DOI: 10.1016/B978-0-12-809807-3.00005-6.
- Smith, D.M. y M.J. Faddy. 2016. Mean and variance modeling of under- and overdispersed count data. J. Stat. 69(6):1-23. DOI: 10.18637/jss.v069.i06.
- Van Leeuwen, T., J. Vontas, A. Tsagkarakou, W. Dermau y L. Tirry. 2010. Acaricide resistance mechanisms in the two-spotted spider mite *Tetranychus urticae* and other important Acari: A review. Insect Biochem. Mol. Biol. 40(8):563-572. DOI: 10.1016/j.ibmb.2010.05.008.
- Venette, R.C. y J.R. Gould. 2006. A pest risk assessment for *Copitarsia spp.*, Insects associated with importation of commodities into the United States. Euphytica. 148(1):165-183. DOI: 10.1007/s10681-006-5950-8.
- Villanueva, J., N. Reyes y M. Abato. 2017. Manejo integrado de plagas y sostenibilidad. En: XIV Simposio Internacional y IX Congreso Nacional de Agricultura Sostenible. La Sociedad Mexicana de Agricultura Sostenible A.C. Obregón, Sonora, México.
- Wang, X., P. Li y S. Liu. 2017. Whitefly interactions with plants. Curr. Opin. Insect Sci. 19:70-75. DOI: 10.1016/j.cois.2017.02.001.
- Weintraub, P., S. Scheffer, D. Visser, G. Valladares, A. Soares Correa, B. Merle Shepard, A. Rauf, S. Murphy, N. Mujica, C. MacVean, J. Kroschel, M. Kishinevsky, R. Joshi,

N. Johansen, R. Hallett, H. Civelek, B. Chen y H. Blanco. 2017. The invasive *Liriomyza huidobrensis* (Diptera: Agromyzidae): understanding its pest status and management globally. J. Insect Sci. 17(1):1-28. DOI: 10.1093/jisesa/iew121.







# 7

## CAPÍTULO



# Manipulación del ambiente lumínico en cultivos en invernadero. Caso mallas fotoselectivas de colores en alstroemeria en la Sabana de Bogotá\*

William Javier Cuervo Bejarano<sup>1</sup>, Angélica María Pardo Pardo<sup>2</sup> y Víctor Julio Flórez Roncancio<sup>3</sup>

219

## RESUMEN

**En los cultivos comerciales**, así como se controla la aplicación de agua y nutrientes, es posible dosificar el espectro lumínico y controlar dimensiones como la calidad y la cantidad. Existen métodos pasivos como el uso de películas plásticas y mallas fotoselectivas, y métodos activos como la suplementación de radiación con luminarias fluorescentes o LED. Las mallas fotoselectivas permiten dispersar el espectro, el intercambio de gases en el dosel y son de fácil uso. Las plantas de alstroemeria poseen características morfofisiológicas y requerimientos edafoclimáticos que facilitan su cultivo en la Sabana de Bogotá; sin embargo, requieren del mantenimiento de agua y temperaturas de suelo que promuevan la generación de tallos florales. En el CBios de la Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano se realizó un

\* Para citar este capítulo: W.J. Cuervo B., A.M. Pardo P. y V.J. Flórez R. 2021. Manipulación del ambiente lumínico en cultivos en invernadero. Caso mallas fotoselectivas de colores en alstroemeria en la sabana de Bogotá. En: Flórez R., V.J. (ed.). Productos relevantes del proyecto Fortalecimiento de la competitividad del sector floricultor colombiano mediante el uso de ciencia, tecnología e innovación aplicadas en Cundinamarca. Bogotá: Ediciones Unisalle, Ceniflores. pp. 218-252.

1. Ingeniero agrónomo y magíster en Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Profesor Corporación Universitaria Minuto de Dios - UNIMINUTO. Correo electrónico: wcuervo@uniminuto.edu - ORCID: 0000-0003-4097-8890.

2. Ingeniera en agroecología, Corporación Universitaria Minuto de Dios - UNIMINUTO. Correo electrónico: angemaripa1218@gmail.com - ORCID: 0000-0002-4701-6443.

3. Ingeniero agrónomo, Universidad Federal de Río Grande del Sur (UFRRS). Doctor en Ciencias, Universidad Estatal de Campinas (UNICAMP). Profesor asociado, Departamento de Agronomía, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Correo electrónico: vjflorezr@unal.edu.co - ORCID: 0000-0002-3081-2400.





experimento en el cual, a través de mallas fotoselectivas de colores Perla y Rojo (P y R), cada una con dos porcentajes de sombra en la PAR (30 y 40), se manipuló el ambiente lumínico en un cultivo de alstroemeria cv. Primadonna. Para las plantas en las cuatro condiciones experimentales y un testigo se compararon variables de crecimiento y de calidad en los tallos florales. Los resultados mostraron que independientemente del color de la malla, a mayor porcentaje de sombra en la PAR (P40 y R40), expresado como menor transmitancia, se obtuvieron mayor número de tallos de mejor calidad en términos de longitud y masa. No se identificaron estreses causados por deficiencia en la fijación de carbono, absorción de nutrientes o consumo de agua, lo que puede sugerir que el cultivar estudiado es más eficiente en condiciones de radiación dispersa donde se puedan mantener humedades relativas y temperaturas apropiadas para el desarrollo de tallos florales. Se requiere de mayor investigación en términos de colores y porcentajes de sombrero de las mallas en la PAR, así como la evaluación en distintos estadios fisiológicos y la medición de variables fitoquímicas como pigmentos que puedan sustentar los beneficios de esta tecnología de bajo costo.

**Palabras clave:** *flores de corte, fotomorfogénesis, fotosíntesis.*

## ABSTRACT

**In commercial crops, water and nutrients** supply are well regulated, in this same sense, it is possible to dose the light spectrum, controlling dimensions such as quality and quantity. There are passive methods such as the use of plastic films and photoselective nets, and active methods such as radiation supplementation with fluorescent or LED lamps. Photoselective nets can manipulate the spectrum passively scattering the spectrum and allowing the exchange of gases in the canopy; in addition, they are easy to use. Alstroemeria plants possess morphophysiological traits and edaphoclimatic requirements that make them adaptable to grow conditions in the Bogotá plateau, however, the crop requires maintaining and controlling soil water content and soil temperature to promote flowering stems development. An experiment in an

alstroemeria cv. Primadonna crop manipulating the light environment using Pearl and Red coloured photoselective nets (P and R), each one at two PAR shade percentages (30 and 40), was carried out in the Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano-CBios facilities. Stem growth and quality variables measured in plants in the four experimental conditions and the control were compared. The results showed that irrespective of the net colour, the greater the PAR shade (R40 and P40), the greater the flower stems harvested and better the quality, expressed in length and dry mass. No nutrient or water deficiencies, or stress conditions were detected, what could suggest that the studied alstroemeria cultivars are more efficient in light scattered conditions where relative humidity and soil temperature are suitable to promote flowering stems development. More research is needed in terms of different colours and PAR shade percentages of photoselective nets, at different phenological stages, as well as measuring some biochemical variables in plants, contents of some secondary metabolites and pigments to demonstrate the benefits of this low-cost technology and can be implemented on a large scale commercially.

221

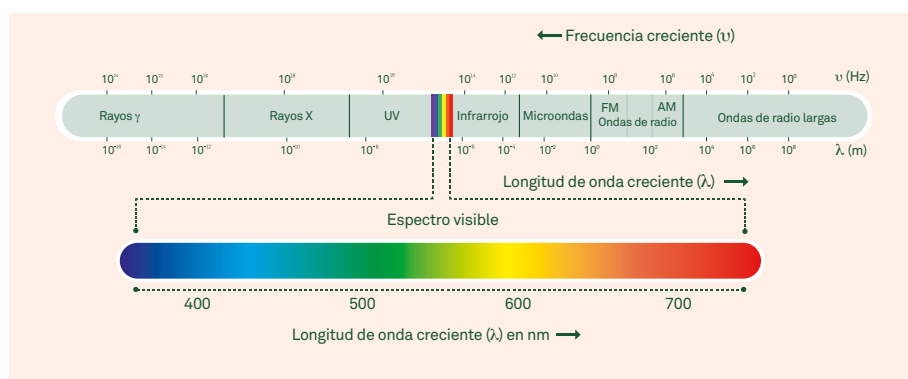
**Keywords:** *cut flowers, photomorphogenesis, photosynthesis.*



# Introducción

La luz se comporta como onda y partícula (fotones) y su contenido de energía no es continuo, sino que se entrega y comporta como paquetes discretos de energía, los cuantos. De acuerdo con la ecuación de Plank, la energía de un fotón es proporcional a la frecuencia o color de la onda de luz (Taiz y Zeiger, 2015; Aphalo, 2006) donde los espectros entre ultravioleta e infrarrojo son de notable importancia para los organismos vivos. La radiación solar se compone aproximadamente de 50 % luz visible, 40 % infrarrojo y 9 % radiación ultravioleta (UV) (Brenner y Hearing, 2008); así, la UV está compuesta por UV-C, UV-B y UV-A comprendidas entre 175-242 nm, 280-315 nm y 315-400 nm, respectivamente (Björn, 2008). La región visible está definida entre 400 y 700 nm, y la región infrarroja se encuentra por encima de 760 nm (figura 7.1).

222 ➔ **Figura 7.1** Espectro de las ondas electromagnéticas. El espectro de radiación fotosintéticamente activa (RFA) corresponde aproximadamente al del espectro visible (400 - 700 nm).



Ecuación de Plank:

$$E_{\lambda} = h\nu = hc/\lambda \quad (1)$$

donde  $E_{\lambda}$  es la cantidad de energía que tiene un fotón,  $h$  es la constante de Plank ( $6,63 \times 10^{-34}$  J s),  $\nu$  es frecuencia de onda de luz,  $\lambda$  es la longitud de onda y  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío ( $3 \times 10^8$  m s $^{-1}$ ).



Las leyes básicas de la fotoquímica establecen que: (1) solo la luz que se absorbe puede tener efectos fotoquímicos (Ley de Grotthuss-Draper); (2) una molécula absorbe un solo cuanto de luz al activarse o, en la fotosíntesis, un fotón excita un electrón, independientemente del color (Ley de Stark-Einstein), y (3) un efecto fotoquímico es directamente proporcional a la dosis total de energía sin importar el tiempo requerido para enviar esta dosis (Ley de la reciprocidad de Bunsen-Roscoe) (Runkle y Bugbee, 2013).

### Medición de la luz

La luz puede ser medida radiométricamente cuando se cuantifica la energía de la radiación electromagnética o fotométricamente cuando se mide solo el espectro visible al ojo humano (tabla 7.1). El flujo radiante es la medida radiométrica de la tasa de flujo de energía por unidad de tiempo, mientras que fotométricamente se denomina flujo luminoso (lm). La intensidad radiante es la densidad de flujo radiante por unidad de ángulo sólido emitido por un punto en el espacio

223

➔ **Tabla 7.1** Magnitudes fundamentales en radiometría y fotometría.

MAGNITUD RADIOMÉTRICA	SÍMBOLO	UNIDAD	MAGNITUD FOTOMÉTRICA	SÍMBOLO	UNIDAD
Flujo radiante	$\phi_e$	W	Flujo luminoso	$\phi_v$	Lumen (lm)
Intensidad radiante	$I_e$	W sr <sup>-1</sup>	Intensidad luminosa	$I_v$	lm sr <sup>-1</sup> = candela (cd)
Irradiancia (sistema energético)	$E_e$	W m <sup>-2</sup>	Iluminancia	$E_v$	lm/ft <sup>2</sup> = foot-candle (fc)
Irradiancia (sistema fotónico)	PPFD	mol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>			
Radiancia	$L_e$	W sr <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup>	Luminancia	$L_v$	lm sr <sup>-1</sup> m <sup>2</sup> = cd m <sup>-2</sup>

**FUENTE:** Adaptado de Lira y Guevara (2017) y Björn (2008).  
Para las magnitudes radiométricas, los símbolos son denotados con el subíndice (*e*), que indica unidades basadas en energía, mientras que para las magnitudes fotométricas se emplea el subíndice (*v*), que señala unidades basadas en el espectro visible.



**La irradiancia**  
(sistema  
energético)  
describe la  
potencia incidente  
por unidad de  
superficie ( $\text{W m}^{-2}$ );  
en sistema fotónico  
hace referencia  
a la densidad de  
flujo de fotones  
fotosintéticos  
(PPFD) usado en  
fisiología vegetal.

propagándose en una dirección específica y se mide en watts por estéreo radián ( $\text{W sr}^{-1}$ ); para la mayoría de las fuentes luminosas reales es una función dependiente de la dirección, así como una magnitud muy útil para caracterizar fuentes puntuales comparadas con la distancia desde la fuente al observador.

La irradiancia (sistema energético) es la magnitud utilizada para describir la potencia incidente por unidad de superficie esférica de todo tipo de radiación electromagnética, y se expresa en  $\text{W m}^{-2}$ , mientras que la irradiancia (sistema fotónico) hace referencia al término densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD) que se usa con frecuencia en la fisiología vegetal. La radiancia es la intensidad radiante por unidad de área en un plano perpendicular a la luz y se expresa en  $\text{W sr}^{-1} \text{m}^{-2}$ .

Las magnitudes fotométricas correspondientes a la irradiancia y a la radiancia son la iluminancia y la luminancia, expresadas en *footcandles* y  $\text{cd m}^{-2}$ , respectivamente.

La interacción de la luz con organismos vivos, más conocido como fotobiología, es un campo que ofrece muchos desafíos para comprender la naturaleza de los procesos inducidos por la luz. Se encarga específicamente de las interacciones de la luz con la materia, que pueden variar en escala de tamaño, desde virus a organismos vivos (Prasad *et al.*, 2003). Un área de la fotobiología es la fotobotánica, que estudia el efecto de la luz en los individuos vegetales (plantas), teniendo en cuenta la luz como factor importante en la fotosíntesis y en la fotomorfogénesis de las plantas, pues factores como la luz, la temperatura y los sustratos para el metabolismo fotosintético ( $\text{CO}_2$ ) intervienen activamente en las alteraciones de la actividad fotosintética, a corto plazo (Kaiser *et al.*, 2018).

En la fisiología vegetal es de interés conocer la irradiancia para diferentes distribuciones direccionales de la luz. En este documento solo se tratarán los conceptos básicos, pero se sugiere a los lectores interesados en profundizar en el tema que consulten documentos más específicos como Björn (2008) y Prasad *et al.* (2003). Las métricas de la luz utilizadas en la fotobiología son: RFA (radiación fotosintéticamente activa, también llamada radiación PAR, por sus siglas en inglés),

PPF (flujo fotónico fotosintético) y PPFD (densidad del flujo fotónico fotosintético). La medición de la luz más adecuada para el uso en plantas es la irradiancia espectral de fotones PAR o PPFD más apropiada que la irradiancia global, por el hecho de que la fotosíntesis utiliza la luz fotón por fotón y es independiente de la energía que está contenida dentro de un fotón. Esto permite realizar comparaciones entre la cantidad de luz y la cantidad de fotosíntesis.

La luz que entra en contacto con las superficies foliares de las plantas es absorbida, transmitida o reflejada (Mohammed *et al.*, 2000); esto es, cuando la luz incide sobre una hoja, parte del espectro se refleja hacia el observador, la reflectancia, que se rige por las propiedades de la superficie foliar y la estructura interna, así como por la concentración y distribución de los componentes bioquímicos (Peñuelas y Filella, 1998). En general, la transmitancia se puede definir como la cantidad de luz transmitida expresada como una fracción de la cantidad de luz que incide sobre un objeto, y la reflectancia es la cantidad reflejada, nuevamente expresada como una fracción de la luz que incide sobre el objeto (Woolley, 1971). Teniendo en cuenta lo anterior, la luz del incidente será absorbida por la hoja, se reflejará desde la superficie de la hoja o se transmitirá sin ser absorbida a través de la hoja (Lichtenthaler *et al.*, 2006).

## Dimensiones de la luz

La luz es una señal de importancia para el crecimiento y desarrollo de la planta, pues interviene en casi todos los aspectos del ciclo de vida, desde que la planta está en germinación hasta su floración; las plantas incluso pueden detectar pequeños cambios en su régimen de luz: calidad, dirección, cantidad, periodo (Campbell y Liscum, 2001; Shahak, 2008), dimensiones que se conocen como las principales; sin embargo, Xu (2016) incluye siete dimensiones específicas de la luz para regular el crecimiento de las plantas: intensidad, calidad, patrón, uniformidad, dirección, polarización y coherencia de la luz.



Las plantas  
pueden regular  
su desarrollo  
al detectar  
pequeños cambios  
en algunas  
dimensiones de  
la luz como la  
intensidad,  
la calidad,  
el patrón, la  
uniformidad,  
la dirección, la  
polarización  
y la coherencia  
de la luz.

Respecto a la cantidad y dirección, se debe considerar la geometría del órgano de la planta que percibe la luz, dado que, según sea la forma del sensor, se cuantifica la luz de diferente manera; sin embargo, se conoce de antemano que los sensores planos se adaptan mejor a las hojas. La cantidad de energía que incide sobre un sensor plano por unidad de área en un intervalo de tiempo se denomina *irradiancia* ( $\text{W m}^{-2}$  o  $\text{J s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ), mientras que en un sensor de luz esférico se denomina *tasa de fluencia* ( $\text{W m}^{-2}$  o  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). Fotométricamente se expresa como  $\text{lm m}^{-2}$ , que es una medida del brillo percibido por el ojo humano, pero en plantas no tiene una aplicación práctica en razón a que estas perciben la luz como paquetes discretos más que como ondas continuas (Xu, 2016).

El patrón de iluminación se refiere a las múltiples combinaciones de modos de iluminación en términos de tiempo y calidades de luz (Xu, 2016), con el objetivo de encontrar algunas respuestas inesperadas de las plantas y conducir a hallazgos interesantes. Por ejemplo, en lugar de 12 h de luz y 12 h de inactividad, se pueden configurar 10 min de encendido y 10 min de apagado alternativamente durante 24 h, o combinación de colores: en lugar de usar 70 % de luz roja y 30 % luz azul, utilizar la luz roja el 70 % del tiempo y la luz azul el 30 % del tiempo. Por otro lado, la uniformidad de la iluminación involucra la cantidad de luz y la distribución espectral, dado que generalmente los ensayos controlados no consideran la distribución de longitudes de onda en las cámaras o la distribución de intensidad que existe en un área específica, por lo cual las plantas y cultivos sometidos a luz adicional empleando arreglos de luces LED o lámparas fluorescentes generan mayor intensidad en el centro de iluminación que en los bordes, lo que conduce a efectos de morfogénesis.

La polarización se refiere a la dirección de propagación de la onda de luz que, en caso de que no exista una sola dirección perpendicular, se conoce como no polarizada; por el contrario, si los campos eléctricos y magnéticos se desvían con simetría transversal, se llama onda polarizada. Varios estudios han reportado los efectos de la luz polarizada en la promoción del crecimiento en plantas (Shibayev y Pergolizzi, 2011); además, señalan que algunas plantas pueden mo-

dular el estado de polarización de la luz incidente cambiando la orientación de las hojas (Shibayama, 2004; Shibayama y Watanabe, 2007).

Por último, la coherencia de la luz explica el fenómeno de que cada fotón que llega a la planta uno seguido del otro de forma independiente no tiene la misma frecuencia, polarización ni relación, lo cual se denomina luz incoherente. Por el contrario, en un láser cada fotón tiene el mismo estado de oscilación, y esto indica que emite luz coherente (Xu, 2016).

## Fotomorfogénesis

La fotomorfogénesis es el efecto de la luz en el control del crecimiento y el desarrollo de las plantas, independientemente de la fotosíntesis (Sabater, 1977). Algunas respuestas fisiológicas son desencadenadas por un solo fotorreceptor, pero en muchos casos múltiples sensores de luz aseguran una respuesta coordinada (Kami *et al.*, 2010). En plantas superiores se conocen diferentes sistemas fotosensoriales: los fitocromos (phys), los cuales detectan radiación en el rango espectral solar de rojo (600-700 nm) (R) y rojo lejano (700-800 nm) (RL) (Kong y Okajima, 2016; Li *et al.*, 2011; Fankhauser, 2001); el locus 8 de resistencia a UV, que monitorea en el rango de radiación ultravioleta B (280-315 nm); con relación a la luz azul (390-500 nm), las respuestas de las plantas están mediadas por tres distintas clases de fotorreceptores, los criptocromos (crys) (Chaves *et al.*, 2011; Lin y Todo, 2005), las fototropinas (phot) (Tokutomi *et al.*, 2008; Christie, 2007; Casal, 2000) y los miembros de la Zeitzlupe (ztl, flk1 y lkp2) (Somers y Fujiwara, 2009; Chen *et al.*, 2004; Quail, 2002).

227

## Fotosíntesis

La fotosíntesis es un proceso en el cual las plantas capturan la energía de la luz solar y la convierten en energía bioquímica, proceso que se utiliza para sustentar la vida en







**Aunque las plantas usan cerca del 50 % de radiación para fotosintetizar, su exposición a la luz produciría estrés por radiación. La fotoinhibición reduce la capacidad fotosintética inducida principalmente por luz visible.**

el planeta, por lo que las plantas la necesitan para su crecimiento (Evans, 2013). Las plantas usan cerca del 50 % de la radiación solar para fotosintetizar; de ahí que la intensidad y calidad de la luz son factores que modulan el desarrollo vegetal (Mendoza-Bautista *et al.*, 2011). Sin embargo, la exposición a la luz puede tener respuestas negativas en las plantas, como, por ejemplo, el estrés por radiación. Lo que ocurre en este proceso es una reducción en la capacidad fotosintética inducida principalmente por la luz visible, fenómeno conocido como fotoinhibición (Powles, 1984), y que ocasiona disminución en la tasa fotosintética cuando la intensidad de luz se eleva por encima de la saturación (Tyystjarvi, 2013). Aunque una reducción en la tasa fotosintética mencionada también puede ser el resultado de la fotooxidación y de otras causas, la fotoinhibición ocurre independientemente de los cambios en la concentración de pigmentos inducidos por exposición a una alta radiación (Goh *et al.*, 2012). La fotoinhibición implica la inactivación fotoquímica de los fotosistemas I (PSI) y II (PSII); no obstante, ocurre principalmente en la cadena de transferencia de electrones localizada en el PSII, sin que se tenga aún consenso sobre las reacciones que se producen para inhibir las actividades de dicho fotosistema (Han *et al.*, 2000; Powles, 1984; Goh *et al.*, 2012). En cuanto a los mecanismos que operan en el transcurso del tiempo de fotoinhibición, estos dependen del estado fisiológico de la planta, por lo que, si las plantas crecen bajo altas intensidades de luz, exhibirán mayor resistencia a la fotoinhibición, comparado con las plantas de la misma especie que se cultivan con poca luz (Keren y Krieger-Liszkayb, 2011).

Todos los organismos con capacidad fotosintética contienen uno o más pigmentos capaces de absorber radiación visible que libera las reacciones fotoquímicas de la fotosíntesis. La mayoría de los pigmentos actúan como una antena, captando la luz y transfiriendo la energía al centro de reacción (Pérez-Urria, 2009); los tejidos vegetales de las plantas contienen carotenoides, junto con clorofilas (Chl) *a* y *b*, pigmentos que se encuentran localizados en los cloroplastos, acumulándose en los tilacoides (Monge *et al.*, 1984). Los carotenoides representan un papel importante en el complejo

de recolección de luz y en la fotoprotección de los fotosistemas, como antioxidantes no enzimáticos, cuya función principal es proteger el aparato fotosintético, disipando la energía para así evitar procesos fotooxidativos dañinos (Petrova *et al.*, 2017; Netto *et al.*, 2005). De acuerdo con Carranco *et al.* (2011), existen dos tipos de carotenoides: los carotenos, que no contienen oxígeno en sus anillos terminales, y las xantofilas que sí lo tienen; por otra parte, las Chl captan porciones de energía luminosa, azul y roja del espectro electromagnético, que se usan en la fotosíntesis (Kuczynska *et al.*, 2015); así mismo, absorben la luz solar y transfieren la energía de excitación a los complejos del centro de reacción (Saga y Tamiaki, 2012). Aunque los contenidos de Chl varían entre especies para adaptarse a distintos ambientes y optimizar la fotosíntesis, las plantas deben ajustarlos (Chl *a*, Chl *b*, Chl *a+b* y Chl *a/b*) (Li *et al.*, 2018).

En estudios biofísicos recientes en fotosistemas de una cianobacteria (*Acaryochloris*) cultivada en luz RL, la separación de carga de los PSI y PSII usa clorofila *f* a 745 nm y clorofila *f* (o *d*) a 727 nm, respectivamente. Cada fotosistema tiene algunas pocas clorofilas *f* que absorben longitudes de onda más largas a las absorbidas por la clorofila *a* y transmiten la energía de excitación a los pigmentos fotoquímicamente activos; de esta manera, proveen la evidencia de que estos fotosistemas funcionan más allá del límite rojo (Nürnberg *et al.*, 2018).

## Manipulación del espectro radiante y sus efectos en el crecimiento de las plantas

La fotosíntesis y la fotomorfogénesis se pueden modular controlando las dimensiones del espectro radiante. La manipulación espectral está dirigida a promover específicamente las respuestas fotomorfogénicas y fisiológicas, mientras que la dispersión mejora la penetración en el interior del dosel (Shahak *et al.*, 2008). La manipulación del espectro en el invernadero puede lograrse ya sea con sistemas de iluminación eléctrica suplementarios con luz roja y roja lejana relativamente alta o mediante filtros espectrales que pueden alterar



La fotosíntesis y la fotomorfogénesis se modulan controlando las dimensiones del espectro radiante. En el invernadero el ambiente lumínico se puede manipular con el uso de LED, películas plásticas y mallas fotoselectivas.



el equilibrio de la luz solar roja y roja lejana (Rajapakse *et al.*, 1999). De igual manera, se puede manipular el ambiente lumínico mediante el uso de LED, películas plásticas y mallas fotoselectivas.

Un LED es un dispositivo semiconductor de estado sólido (Landis *et al.*, 2013). Esta iluminación representa una tecnología diferente a las utilizadas hasta ahora, como las bombillas incandescentes, por lo que los LED tienen grandes ventajas sobre las formas tradicionales de iluminación hortícola, debido a su pequeño tamaño, durabilidad, larga vida útil, y la opción de seleccionar longitudes de onda específicas para una respuesta de planta específica; además de reducir los costos de energía y mantenimiento, acelera la floración y previene el alargamiento excesivo del tallo de algunas especies de plantas (Massa *et al.*, 2008; Gómez e Izzo, 2018). Para explorar los efectos de la iluminación suplementaria en el cultivo de pimienta en invernadero, Li *et al.* (2016) usaron dos juegos de luces LED con diferentes fuentes de luz y obtuvieron un mayor rendimiento en las plantas, mejora en su capacidad fotosintética, mayor peso en frutos y mayor masa seca; igualmente, fue beneficioso para la altura de la planta y el diámetro de los tallos.

El uso de películas plásticas con aditivos fotoselectivos se ha venido desarrollando en Europa y Japón; este tipo de tecnologías incluye la adición de moléculas que absorben longitudes de onda R y RL, modificando de esta manera la relación R:RL (Rajapakse *et al.*, 1999; Li y Rajapakse, 2003). El inconveniente es que se presenta una disminución en el PPF, lo que ha limitado su implementación.

Las mallas fotoselectivas de color permiten la transmisión de parte del espectro sin modificarlo a través de los orificios, mientras que, dependiendo del color y los aditivos de cada material, modificará el espectro en términos de calidad y dispersión (Shahak *et al.*, 2004); así, si se incrementa la dispersión, la radiación penetrará en doseles densos y promoverá la fotosíntesis en hojas maduras y fotosintéticamente activas (Abbasnia *et al.*, 2019; Shahak, 2014; Shahak *et al.*, 2008).

Muchas de las experiencias con mallas fotoselectivas se han realizado en climas áridos. Es así como Shahak (2004;

2008) ha realizado diversos estudios en plantas hortícolas de consumo, ornamentales y frutales. Entre los resultados más interesantes ha encontrado las mallas fotoselectivas que permiten hacer un uso eficiente de la energía solar, reducir la aplicación de productos para el control fitosanitario y, por tanto, mitigar los riesgos ambientales, por lo que se perfila como una tecnología de amplio uso en distintos climas y especies vegetales.

En algunos frutales se ha demostrado que los cambios en la composición de la luz en R, RL y azul tienen respuestas diferencialmente morfológicas y fotosintéticas (Bastías *et al.*, 2012). Con mallas fotoselectivas de colores se han reportado incrementos en rendimientos, calidades y componentes nutraceuticos, como en arándano (Rodríguez y Morales, 2015), tomate y pimiento (Ilić *et al.*, 2014; Ilić *et al.*, 2017; Tinyane *et al.*, 2013); mejor enraizamiento de material de propagación, brotes más robustos y largos, mayor tasa fotosintética y conductancia estomática en limón carrizo y mandarina (Brar *et al.*, 2020). De otras hortalizas como cilantro, ajo y fenogreco se obtuvo mayor número de brotes laterales, así como mayor biomasa y longitud de raíz (Desai *et al.*, 2016). En especies forestales, donde usualmente se utiliza polisombra negra, las mallas de colores representaron beneficios en la propagación de *Pinus radiata*, *Eucalyptus nitens* y *Eucalyptus globulus* (Bustos *et al.*, 2019). Para ornamentales, parámetros como la longitud, el diámetro y el número de tallos son de importancia notable; se han reportado casos positivos en *Cordyline terminalis* (Gauray *et al.*, 2016), y en clavel (Hlatschwayo y Wahome, 2010). En *Pittosporum variegatum* y *Ruscus hypoglossum* (Espinoza, 2010), *Phalaenopsis* (Leite *et al.*, 2008), *Aspidistra elatior* y *Philodendro xanadu* (Stamps, 2008), mejoraron la brotación y la longitud de los brotes. En Colombia pocos son los casos en los cuales se ha implementado este tipo de tecnologías, como flores de corte, verduras y algunos frutales (Casierra-Posada *et al.*, 2012), lo que indicaría mínimo interés o escaso conocimiento sobre el uso de estas mallas con fines comerciales en cultivos.



Con mallas  
fotoselectivas  
se reportan  
incrementos en  
rendimiento,  
calidad y  
componentes  
nutracéuticos  
(arándano, tomate  
y pimienta). Para  
longitud, diámetro  
y número de  
tallos hay mejoras  
en *Cordyline  
terminalis* y *clavel*.

## Manipulación del espectro luminoso con mallas fotoselectivas de colores en un cultivo de alstroemeria en la Sabana de Bogotá

### Consideraciones morfológicas y ecofisiológicas en alstroemeria

Alstroemeria es uno de los géneros de la familia Alstromeriaceae, y se caracteriza por encontrarse principalmente en América del Sur (Sanso *et al.*, 2005; Lyshede, 2002). A causa de sus rasgos estéticos, diversidad de especies naturales e hibridadas y larga vida en florero, es cultivada con fines ornamentales y paisajistas, como flor de corte o en materia (Bridgen, 2018).

Los tallos aéreos de alstroemeria surgen de un rizoma blanco de crecimiento simpodial que desarrolla raíces de almacenamiento y fibrosas, y en donde cada subsiguiente brote aéreo surge de la primera yema axilar del brote anterior, y una segunda yema axilar tiene el potencial de desarrollar rizoma lateral, el cual dará lugar a brotes aéreos adicionales. El tallo floral de esta especie consiste en un arreglo circular de cimas florales (un tallo con la flor central que florece primero) y en cada cima individual con entre uno y cinco botones florales dispuestos simétricamente. En la espiral de cimas, las flores se abren secuencialmente desde la base hasta la punta con cada flor en su eje, alcanzando la madurez a medida que se abre la próxima flor (Bridgen, 1993; Heij, 2002; Bridgen 1997; Healy y Wilkins, 1985; Healy y Wilkins, 1991; Bridgen y Bartok, 1990).

Los hábitats de origen de las especies de alstroemeria van desde la alta montaña en los Andes al sur del continente americano, hasta desiertos costeros. De allí la influencia de los parentales en los requisitos específicos para la inducción floral de los híbridos, que se pueden separar en dos grupos: el blanco/amarillo, que se originó de un cruce interespecífico, y el rojo/naranja, producto de varios cruces interespecíficos diferentes. El efecto de la temperatura muestra especificidad de grupo con el tipo “Orchid” (grupo blanco/amarillo) con requerimiento de un tratamiento de frío más corto (2 a 4 semanas de 4,5 °C) para la inducción floral. La variabi-

lidad entre los dos grupos podría relacionarse con aspectos de los parentales. Aquellos del grupo blanco/amarillo tienen un progenitor (*A. violacea*) de los desiertos costeros donde la temperatura promedio de invierno es de 12,7 °C, mientras que el cultivar rosado “Regina”, del grupo rojo/naranja, tiene parentales (*A. pelegrina*) de bosques de las tierras altas, donde la temperatura promedio de invierno es de 11 °C. El otro progenitor, en ambos híbridos, fue *A. aurantica*, lo cual sugiere que cada especie que entra en un nuevo híbrido puede modificar el mecanismo de control de la floración. Una vez que empieza la floración, las plantas continuarán produciendo brotes florales indefinidamente hasta que la temperatura del suelo supere los 15,5 °C durante periodos prolongados. En razón a que la parte subterránea de la planta debe mantenerse fría (13 °C) para que continúe la floración, estrategias de manejo con acolchados o que alienten el enfriamiento por aire evaporativo ayudarán a mantener una temperatura fría del suelo. Entonces, en función de las condiciones ambientales previas, los brotes aéreos pueden ser vegetativos o reproductivos; normalmente, los brotes que han desplegado más de 30 hojas no florecerán, serán vegetativos (Heij, 2002; Healy y Wilkins, 1985; Healy y Wilkins, 1991).

El otro componente que controla la inducción floral en alstroemeria es el fotoperiodo. La iluminación suplementaria estándar para proveer 13 h de luz como interrupción nocturna acelera la iniciación floral. Dicha interrupción es efectiva en promover la floración temprana sin disminuir la producción de flores. La iluminación de plantas sin vernalizar no inducirá la floración, y los fotoperiodos de más de 13 h no adelantarán la floración temprana y sí pueden disminuir la producción de flores. Con los rizomas inducidos a florecer por bajas temperaturas y días largos (DL), los brotes que se formen florecerán hasta que los nuevos brotes no sean inducidos, debido a altas temperaturas del suelo. De otro lado, se ha demostrado que la intensidad de la luz afecta el desarrollo de los tallos florales. En ese sentido, las bajas intensidades de luz pueden disminuir el diámetro del tallo; y, como el número de cimas por tallo se correlaciona positivamente con el diámetro del tallo, las plantas deben cultivarse con el máximo





**El control de la floración en alstroemeria involucra un mecanismo bifásico: un requerimiento absoluto de baja temperatura en el rizoma, seguido de un tratamiento de DL, acentuado con radiación de alta intensidad.**

de luz disponible, de tal manera que se obtenga el mayor número de cimas por tallo. Por tanto, el mecanismo de control de la floración para los híbridos de alstroemeria involucra un mecanismo bifásico: un requerimiento absoluto de baja temperatura, seguido de un tratamiento de DL para promover una floración rápida. Este efecto de DL es acentuado con radiación de alta intensidad. Entre tanto, las condiciones ambientales que promueven la floración inhiben el desarrollo de la parte aérea y de las raíces de almacenamiento (Heij, 2002; Healy y Wilkins, 1985; Healy y Wilkins, 1991).

Por lo aquí expuesto, se entiende que en las condiciones agroecológicas de la Sabana de Bogotá, e incluso del altiplano cundiboyacense u otras regiones altoandinas del país, se presentarían las condiciones edafoclimáticas apropiadas para el cultivo exitoso de esta especie con fines de exportación, en el sentido de satisfacer los requisitos de vernalizar el rizoma a baja temperatura (13 °C) y de fotoperiodo, entre 12 y 13 h, para el desarrollo apropiado de los tallos florales, aunque bien valdría la pena intentar alargar la longitud del día o interponer un tratamiento de noche interrumpida de corta duración, de no más allá de una hora. A partir de materiales híbridos, condiciones de invernadero y diversas labores culturales y con una densidad de siembra, en promedio de 24 000 plantas/ha, se logran producir hasta 250 tallos/m<sup>2</sup>/año.

La irradiación es un factor importante para el desarrollo vegetal y, en este aspecto, la alstroemeria es muy sensible a la irradiación, pues a concentraciones de CO<sub>2</sub> ambiental, la fotosíntesis a nivel de la hoja se satura a cerca de 600 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> de PAR (Leonardos *et al.*, 1994); además, se debe proteger el suelo de las altas temperaturas, lo que sugeriría el uso de algún tipo de filtro para la radiación.

Las plantas de alstroemeria presentan aspectos morfológicos y anatómicos funcionales característicos, como las hojas resupinadas, en donde el peciolo se encuentra permanentemente torcido, de manera tal que la lámina foliar abaxial se encuentra hacia arriba y la adaxial hacia abajo (Hofreiter y Lyshede, 2006); otra característica es la presencia de idioblastos en el mesófilo que contienen rafidios de oxalato y es-tomas hundidos en ambas superficies foliares (Sanso *et al.*,

2005; Lyshede, 2002). La acumulación de cristales de oxalato de calcio y su degradación en algunas especies ha sugerido la existencia de una nueva ruta para la asimilación fotosintética del carbono denominada “fotosíntesis de alarma” (Tooulakou *et al.*, 2016), un hallazgo novedoso que podría explicar algunos mecanismos fisiológicos en especies del género *Alstroemeria*. En estas plantas, la raíz es el vertedero dominante, por lo que factores como la temperatura afectarán su dominancia, y la regulación de este factor es un aspecto clave en la producción comercial.

El uso de mallas de colores como medio para la manipulación del espectro transmitido a los cultivos no es común en el país, y menos en condiciones bajo cubierta en la Sabana de Bogotá, donde por existir un filtro previo (películas plásticas del invernadero) no se considera necesario restar más radiación a los cultivos. Por lo anterior, se realizó un experimento con el objetivo de determinar el efecto de filtrar el espectro de radiación con mallas fotoselectivas de colores en algunas variables de crecimiento en alstroemeria cv. Primadonna en condiciones de la Sabana de Bogotá.

## 7.1 Materiales y métodos

La investigación se efectuó en Chía, Cundinamarca, en el Centro de Bio-sistemas Alberto Lozano Simonelli (CBios) de la Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano (4°53'N, 74°08'O, 2579 msnm), con temperatura y humedad relativa promedio de 14 °C y 83 %, respectivamente. Rizomas de plantas de alstroemeria (*Alstroemeria* spp.) cv. Primadonna, con una edad aproximada de siete semanas, se sembraron en un invernadero multitúnel de 3025 m<sup>2</sup>, diseñado bajo la norma europea para invernaderos EN 13031 y construido en acero galvanizado (Astma-653). El invernadero constó de cinco naves de 11 × 55 m cada una, con cinco camas (11 × 1 m) separadas a 50 cm, y en cada bloque las camas laterales correspondían al efecto borde. Las plantas se sembraron a doble hilera equidistantes a 25 cm y en la hilera a 40 cm entre plantas, para una densidad de 4,9 plantas por m<sup>2</sup>/invernadero



El uso de mallas para manipular el espectro transmitido a los cultivos no es común en horticultura, donde por existir películas plásticas del invernadero se considera contraproducente restar más radiación a los cultivos.





y un total de 3400 plantas. El manejo del cultivo se llevó a cabo de la misma manera que en los sistemas comerciales.

### 7.1.1 Diseño experimental

En la semana 37 después de siembra (37 SDS) se instalaron, a una altura aproximada de 3 m sobre el nivel del suelo, mallas fotoselectivas de tejido tipo Raschel de colores perla (P) y rojo (R) (ChromatiNet® Pearl y Chromatinet® Red, Ginnegar Plastic Products Ltd.) con porcentajes de sombrío en el espectro de la PAR de 30 y 40 %, correspondientes a tamaños de orificio de 3 × 2 mm y 6 × 8 mm, respectivamente. De esta manera se configuraron cuatro tratamientos (P30, P40, R30 y R40) y se compararon con un testigo comercial sin malla (T) (figura 7.2). Los tratamientos fueron asignados aleatoriamente a las unidades experimentales (cama de 15 m), y en cada tratamiento se llevaron a cabo tres repeticiones.

### 7.1.2 Variables medidas y análisis de datos

#### 7.1.2.1 Temperatura, humedad relativa y transmitancia de las mallas fotoselectivas

Se registraron la temperatura y la humedad relativa utilizando un termopar tipo T (cobre-constantán) conectado a un



**Figura 7.2** Mallas fotoselectivas de colores perla y rojo instaladas en un cultivo de alstroemeria cv. Primadonna en condiciones de invernadero en el Centro de Bio-sistemas Alberto Lozano Simonelli (CBios) de la Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.

Fotografías: Angélica María Pardo Pardo



registrador de datos (Cox-Tracer Junior, Escort DLS, Edison, NJ). Cada termopar se colocó dentro de un cilindro blanco de PVC, con el fin de reflejar la luz solar directa, y se ubicó en el punto central de cada tratamiento a una altura de 1,6 m del suelo.

Al nivel del tercio superior del cultivo se midió el espectro transmitido por cada una de las mallas utilizando un espectrómetro con una sensibilidad entre 200 y 1100 nm con resolución de 5 nm (Flame S-XR1-ES, Ocean Optics Inc., USA) y registrados con el *software* Ocean View 1.6.7.

### 7.1.2.2 Variables de las plantas

En la 62 SDS se midieron la longitud y diámetro del tallo, diámetro del botón floral y número de botones en un tallo floral de cada nueve plantas por tratamiento, las cuales fueron seleccionadas aleatoriamente al inicio del ensayo. Semanalmente y desde la semana 56 hasta la semana 62 SDS se seleccionaron seis tallos que presentaran un estadio de desarrollo similar a aquellos en los cuales se realizaban las medidas descritas previamente. Estos tallos fueron cosechados, dispuestos en bolsas plásticas y llevados al Laboratorio de Fisiología vegetal de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá; allí se separaron las hojas de los tallos florales para medir el área foliar en el medidor de área foliar (LI-COR LI-3100C); luego, las hojas, botones y tallos se acondicionaron de forma independiente en bolsas de papel y se llevaron al horno a temperatura de 70 °C por cuatro días, para determinar su masa seca. Adicionalmente, entre las 59 y 63 SDS se cosecharon tallos y se registró la cantidad de tallos clasificados en los grados de calidad Perfection®, Super Select, Fancy y estándar, conforme a lo establecido en los sistemas productivos comerciales.

Luego de comprobar los supuestos de normalidad de residuales y homogeneidad de varianzas, los datos de las variables continuas de las plantas se sometieron a análisis de varianza de una vía, y las diferencias de medias se determinaron con la prueba de Tukey a un nivel de significancia de 0,05. Para la variable de conteo (número de tallos cosechados) se aplicó una regresión binomial negativa (Lindén y Mäntyniemi, 2011; O'Hara y Kotze, 2010) y posteriormente una





No hubo efecto del color de malla, pero sí del porcentaje de PAR filtrada; cuanto más filtrada, tallos más largos, con mayor acumulación de masa seca, sin diferencias en diámetro, y mayor número de tallos de mejor calidad.

comparación de medias ajustada a Tukey. Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el *software* R (R Core Team, 2019) y el IDE RStudio Team (RStudio Team, 2015).

## 7.2 Resultados relevantes y discusión

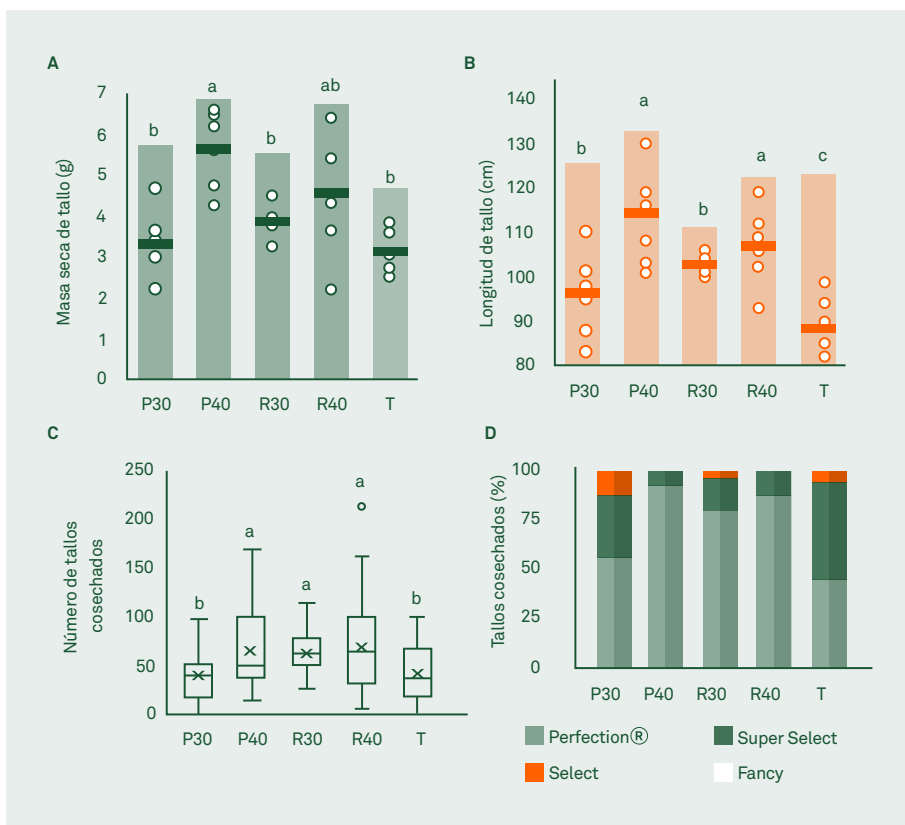
El análisis de varianza determinó que el efecto del tipo de malla en la masa seca del tallo fue significativo,  $F(4, 25) = 7,45$ ,  $P < ,001$ . Posteriormente, una prueba *post hoc* de Tukey mostró que la masa seca de los tallos florales en P40 difirió significativamente ( $P < ,05$ ) de P30, R30 y T, mas no de R40, y esta última no mostró diferencias con P30, R30 y T (figura 7.3A). Un comportamiento similar se presentó en la longitud de los tallos florales; el análisis de varianza mostró que el efecto del tipo de malla en la longitud del tallo fue significativo,  $F(4, 30) = 12,44$ ,  $P < ,001$  y la prueba *post hoc* de Tukey indicó que las mallas P40 y R40 no presentaron diferencias entre ellas y que difirieron significativamente ( $P < ,05$ ) de P30, R30 y T; este último fue diferente a P30 y R30, sin que estos dos fueran diferentes entre sí (figura 7.3B). El número de tallos cosechados en la 62 SDS en función de los tratamientos con mallas y el testigo fue modelado utilizando una regresión binomial negativa (Lindén y Mäntyniemi, 2011; O'Hara y Kotze, 2010). En promedio, el número de tallos cosechados en los tratamientos P40, R30 y R40, serán 1,6 ( $P = ,002$ ), 1,56 ( $P = ,005$ ) y 1,65 ( $P < ,001$ ) veces los cosechados en T (figuras 7.3C y 7.3D).

De las variables analizadas, solo se presentó el efecto de los tratamientos en la longitud y masa seca del tallo (figuras 7.3A y 7.3B). Aparentemente no hay efecto del color de la malla, pero sí del porcentaje de espectro de PAR filtrada, lo que indica que, a mayor porcentaje de PAR filtrada, mayor acumulación de masa seca en tallos (figura 7.4). Tallos más largos, con mayor masa seca acumulada y sin diferencias en los diámetros (datos no mostrados) pueden sugerir que la elongación de los tallos no se realizó a expensas de la masa seca, por lo que se obtuvo mayor número de tallos de mejor calidad

➔ **Figura 7.3** **A.** Valores promedio para masa seca; **B.** Longitud; **C.** Número de tallos calidad Perfection®, y **D.** Proporción de cada grado de calidad (Perfection®, Super Select, Select y Fancy) de tallos de alstroemeria cv. Primadonna cosechados en la semana 62 después de siembra. Las plantas estuvieron sometidas a cuatro condiciones de manipulación del espectro con mallas fotoselectivas: color perla con 30 y 40 % de sombra en el espectro de la PAR (P30 y P40, respectivamente), color rojo con 30 y 40 % de sombra en el espectro de la PAR (R30 y R40, respectivamente) y sin manipulación (T).

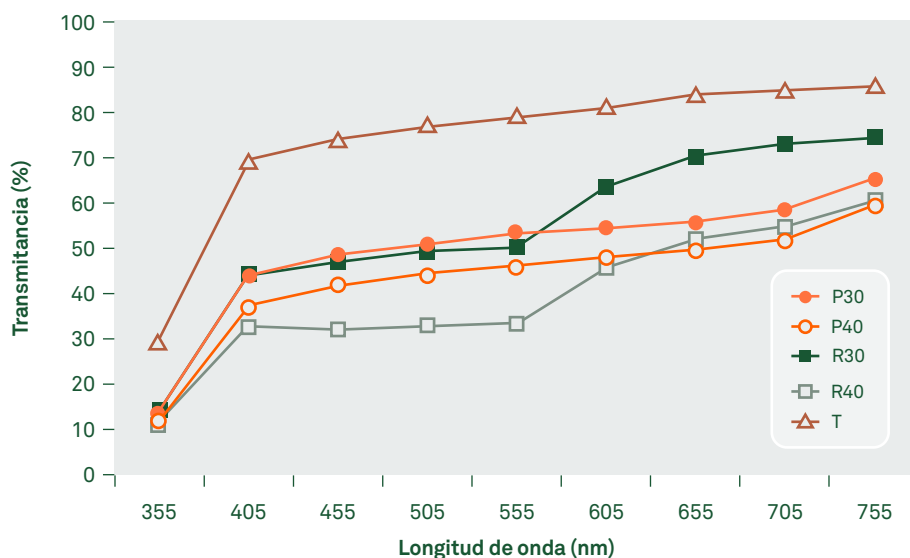
Medias con letras distintas son significativamente diferentes (Tukey  $P < .05$ ).

Clasificación de acuerdo con los rangos de longitud del tallo (cm): Fancy: 40 a 60; Perfection®: 40 a 60; Select: 61 a 80; Super Select: 81 a 100.



(figuras 7.3C y 7.3D). Lo anterior puede relacionarse con que posiblemente los mayores porcentajes de dispersión de la PAR y la relación PAR:UV (Shahak *et al.*, 2004) incrementaron la eficiencia fotosintética en esta especie. Otra posible explicación a una mayor eficiencia fotosintética es que los cristales de oxalato de calcio, característica de varias especies

➔ **Figura 7.4** Porcentajes de transmitancia del espectro radiante entre los 355 y 755 nm, dentro de un invernadero del área experimental del CBios, luego de ser filtrados por las mallas fotoselectivas color perla con 30 y 40 % de sombra en el espectro de la PAR (P30 y P40, respectivamente), color rojo con 30 y 40 % de sombra en el espectro de la PAR (R30 y R40, respectivamente) y sin manipulación (T). P30: círculo lleno, P40: círculo vacío, R30: cuadrado lleno, R40: cuadrado vacío; T: triángulo vacío.



240

de este género, hayan dispersado aún más la radiación absorbida por el dosel (Pierantoni *et al.*, 2018; Pierantoni *et al.*, 2017; Gal *et al.*, 2012) o hayan servido como fuente alternativa de C (Duah *et al.*, 2019; Kong *et al.*, 2017; Tooulakou *et al.*, 2016). La mayor eficiencia en la distribución de la luz induce a la floración (Germanà *et al.*, 2003).

Aunque no hay diferencias en la temperatura del dosel entre tratamientos con malla o sin ella (tabla 7.2), pudo presentarse una modificación en la arquitectura del dosel favoreciendo el intercambio de gases, reduciendo la transpiración, disminuyendo el fotodaño y la fotorrespiración (Matloobi, 2012; Leonardos *et al.*, 1994). Adicionalmente, reduciendo los deltas de temperatura entre el suelo y dosel, y dado que la raíz es el vertedero dominante, esta regulación térmica manipularía también la dominancia de los vertederos (Leonardos *et al.*, 1996).

➔ **Tabla 7.2** Valores promedio de humedad relativa y temperatura para cada uno de los tratamientos registrados entre el 14 de diciembre de 2017 y el 7 de febrero de 2018.

VARIABLE	TRATAMIENTO				
	P30	P40	R30	R40	T
Humedad relativa (%)	88,35	91,95	91,11	86,17	86,19
Temperatura (°C)	14,08	14,64	14,55	14,40	14,69

## 7.3 Conclusiones

Son evidentes las ventajas de la manipulación del espectro lumínico en plantas cultivadas con el objetivo de maximizar ciertos rasgos comerciales. Para cultivos a libre exposición, y más aún en aquellos bajo cubierta, es posible manipular el espectro incidente a través del uso de mallas fotoselectivas de colores. Para ello se requiere de investigación más exhaustiva en términos de colores, grados de sombra sobre la PAR, especies y estadios fenológicos. Estas tecnologías podrían mejorar el uso eficiente de recursos como el agua, los fertilizantes, minimizar la aplicación de productos para el control fitosanitario e incrementar la calidad de los productos cosechados.

En este experimento se identificó que la manipulación de la cantidad del espectro independiente de la calidad afectó positivamente las características deseables de calidad de los tallos de alstroemeria cv. Primadonna. La reducción en la transmitancia pudo haber mantenido un microclima a nivel del dosel y del suelo más apropiado para la promoción de tallos florales, sin aparentemente afectar la tasa de fijación de carbono ni la nutrición de las plantas. Además, podría incrementarse la eficiencia en el uso del fertirriego, con los consecuentes ahorros económicos y ambientales. Es de anotar que el manejo fitosanitario puede verse beneficiado por este tipo de manipulación lumínica, al controlar la incidencia de algunas plagas y enfermedades. A pesar de que en Colombia el desarrollo en tecnologías para el manejo de radiación en cultivos es incipiente, estos experimentos presentan las posibilidades de la implementación de la manipulación del espectro lumínico a nivel comercial.



## Agradecimientos

Al proyecto “Fortalecimiento de la competitividad del sector floricultor colombiano mediante el uso de ciencia, tecnología e innovación aplicadas en Cundinamarca”, financiado por el Sistema General de Regalías, y ejecutado en alianza entre la Universidad de La Salle, la Gobernación de Cundinamarca, la Asociación Colombiana de Exportadores de Flores (Asocolflores), el Centro de Innovación de la Floricultura Colombiana (Ceniflores), la Universidad Nacional de Colombia y la Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.

## Conflictos de interés y contribuciones de autoría

El manuscrito fue preparado y revisado de manera conjunta por los autores, quienes declaran no tener ningún conflicto de interés que comprometa la validez de los resultados aquí presentados.

## Referencias

- Abbasnia Z., S.K., S. Sedaghatthoor, M.-N. Padasht D. y D. Hashemabadi. 2019. The effect of light variations by photoselective shade nets on pigments, antioxidant capacity, and growth of two ornamental plant species: Marigold (*Calendula officinalis* L.) and violet (*Viola tricolor*). *Cogent Food Agric.* 5(1):1-16. DOI: 10.1080/23311932.2019.1650415.
- Aphalo, P. 2006. Light signals and the growth and development of plants —a gentle introduction. The plant photobiology notes I. 7-39. University of Helsinki, Finlandia. Disponible en: [http://www.esalq.usp.br/lepse/imgs/conteudo\\_thumb/Light-signals-and-the-growth-and-development-of-plants---a-gentle-introduction.pdf](http://www.esalq.usp.br/lepse/imgs/conteudo_thumb/Light-signals-and-the-growth-and-development-of-plants---a-gentle-introduction.pdf). Consulta: junio de 2020.
- Bastías, R., L. Manfrini y L. Grappadelli. 2012. Exploring the potential use of photo-selective nets for fruit growth re-

- gulation in apple. *Chil. J. Agr. Res.* 72(2):224-231. DOI: 10.4067/S0718-58392012000200010.
- Björn, L. 2008. *Photobiology*. 1.<sup>a</sup> ed. Nueva York: Springer Science Business Media. 684p.
- Brar, H.S., A. Thakur, H. Singhy N. Kaur. 2020. Photosensitive coverings influence plant growth, root development, and buddability of citrus plants in protected nursery. *Acta Physiol Plant.* 42(18). DOI: 10.1007/s11738-019-2998-3.
- Brenner, M. y V. Hearing. 2008. The protective role of melanin against UV damage in human skin. *Photochem. and Photobiol.* 84(3):539-549. DOI: 10.1111/j.1751-1097.2007.00226.x.
- Bridgen, M.P. y J. Bartok. 1990. Evaluation of a growing medium cooling system and its effects on the flowering of *Alstroemeria*. *HortSci.* 25(12):1592-1594. DOI: 10.21273/HORTSCI.25.12.1592.
- Bridgen, M.P. 1993. *Alstroemeria*. pp. 201-209. En: De Hertogh, A.A. y M. Le Nard (eds.). *The physiology of flower bulbs: a comprehensive treatise on the physiology and utilization of ornamental flowering bulbous and tuberous plants*. Ámsterdam: Elsevier Publishing. 812p.
- Bridgen, M.P. 1997. *Alstroemeria*. pp. 341-348. En: Ball, V. (ed.). *Ball Red Book*, v. 11, 16.<sup>a</sup> ed. Chicago: Geo. J. Ball Publishing Co. 802p.
- Brigden, M.P. 2018. *Alstroemeria*. pp. 231-236. En: Van Huylbroeck, J. (ed.). *Ornamental Crops. Handbook of Plant Breeding*. Melle: Springer International Publishing. 887p.
- Bustos-Salazar, A. y A. Zúñiga-Feest. 2019. Efecto de mallas raschel de colores en el crecimiento de plántulas de *Eucalyptus globulus*, *Eucalyptus nitens* y *Pinus radiata* en condiciones de vivero. *Bosque.* 40(3):287-298. DOI: 10.4067/S0717-92002019000300287.
- Campbell, T.J. y E. Liscum. 2001. Plant photobiology 2001. A thousand points of enlightenment from receptor structures to ecological adaptation. *The Plant Cell.* 13(8):1704-1710. DOI: 10.1105/tpc.13.8.1704.
- Carranco, E., M. Calvo y F. Pérez-Gil. 2011. Carotenoides y su función antioxidante: Revisión. *Archivos Latinoa-*





- americanos de Nutrición. 61(9):233-241. Disponible en: <https://www.alanrevista.org/ediciones/2011/3/art-1/#>. Consulta: junio de 2020.
- Casal, J. 2000. Phytochromes, cryptochromes, phototropin: photoreceptor interactions in plants. *Photochem. and Photobiol.* 71(1):1-11. DOI: 10.1562/0031-8655(2000)0710001PCPPII2.0.CO2.
- Casierra-Posada, F., P. Nieto y C. Ulrichs. 2012. Crecimiento, producción y calidad de flores en calas (*Zantedeschia aethiopica* (L.) K. Spreng) expuestas a diferente calidad de luz. *Rev. udca Act. & Div. Cient.* 15(1):97-105. Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S0123-42262012000100011&lng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0123-42262012000100011&lng=es). Consulta: junio de 2020.
- Chaves, I., R. Pokorny, M. Byrdin, N. Hoang, T. Ritz, K. Brettel, L. Essel, G. Van der Horst, A. Batschauer y M. Ahmad. 2011. The cryptochromes: blue light photoreceptors in plants and animals. *Annu. Rev. Plant Biol.* 62(1):335-364. DOI: 10.1146/annurev-arplant-042110-103759.
- Chen, M., J. Chory y C. Fankhauser. 2004. Light signal transduction in higher plants. *Annu. Rev. Genet.* 38(1):87-117. DOI: 10.1146/annurev.genet.38.072902.092259.
- Christie, J. 2007. Phototropin blue-light receptors. *Annu. Rev. Plant Biol.* 58(1):21-45. DOI: 10.1146/annurev-arplant.58.032806.103951.
- Desai, C.D., B.V. Padhiar y P.S. Mistry. 2016. Biomass yield of spice crops as affected by light intensity under different photo-selective colour shadenets. *Ecology, Environment and Conservation Paper.* 22: 229-233. Disponible en: [http://www.envirobiotechjournals.com/article\\_abstract.php?aid=6802&iid=209&jid=3](http://www.envirobiotechjournals.com/article_abstract.php?aid=6802&iid=209&jid=3).
- Duah, S., Z. Nagy y L. Helyes. 2019. The effect of different shading net on the Quantum Efficiency of PS II in chilli pepper cultivar 'Star Flame'. *Acta Agraria Debrecenensis.* 2:21-23. DOI: 10.34101/actaagrar/2/3673.
- Espinoza, J.L. 2010. Efecto de la radiación transmitida y el color de la malla sombra sobre el crecimiento y rendimiento de plantas en la horticultura. Tesis de especiali-

- zación. Agroplasticultura. Centro de Investigación Química Aplicada, Saltillo, México.
- Evans, J.R. 2013. Improving photosynthesis. *Plant Physiol.* 162(4):1780-1793. DOI: 10.1104/pp.113.219006.
- Fankhauser, C. 2001. The phytochrome, a family of red/far-red absorbing photoreceptors. *J. Biol. Chem.* 276(15):11453-11456. DOI: 10.1074/jbc.R100006200.
- Gal, A., V. Brumfeld, S. Weiner, L. Addadi y D. Oron. 2012. Certain biominerals in leaves function as light scatterers. *Adv. Materials.* 24(10):77-83. DOI: 10.1002/adma.201104548.
- Gaurav, A.K., D. Raju, T. Janakiram, B. Singh, R. Jain y S. Krishnan. 2016. Effect of different coloured shade nets on production and quality of cordyline. *Indian J. Agr. Sci.* 86(7):865-869. Disponible en: <http://epubs.icar.org.in/ejournal/index.php/IJAgS/article/view/59736>. Consulta: junio de 2020.
- Germanà, C., A. Continella y E. Tribulato. 2003. Net shading influence on floral induction on citrus trees. *Acta Hort.* 614:527-533. DOI: 10.17660/ActaHortic.2003.614.78.
- Goh, C., S. Ko, S. Koh, Y. Kim y H. Bae. 2012. Photosynthesis and environments: photoinhibition and repair mechanisms in plants. *J. Plant Biol.* 55(2):93-101. DOI: 10.1007/s12374-011-9195-2.
- Gómez, C. y L. Izzo. 2018. Increasing efficiency of crop production with LEDs. *AIMS Agr. and Food.* 2:135-153. DOI: 10.3934/agrfood.2018.2.135.
- Han, B., M. Virtanen, J. Koponen y M. Straskraba. 2000. Effect of photoinhibition on algal photosynthesis: a dynamic model. *J. Plankton Res.* 22(5):865-885. DOI: 10.1093/plankt/22.5.865.
- Healy, W.E. y H.F. Wilkins. 1985. *Alstroemeria*. pp. 419-424. En: Halevy, A.H. (ed.). *Handbook of flowering*. 1.<sup>a</sup> ed. Boca Ratón: CRC Press - Taylor & Francis Group. 582p.
- Healy, W.E. y H.F. Wilkins. 1991. *The cut flower crop*. pp. 311-316 En: Ball, V. (ed.). *Ball Red Book, Greenhouse Growing*, 15.<sup>a</sup> ed. Chicago: Geo. J. Ball Publishing. 802p.
- Heij, G. 2002. *Alstroemeria literature survey. A review of 10 years of Dutch applied research*. Wageningen: Applied



- Plant Research BV. 22p. Disponible en: [edepot.wur.nl/460586](http://edepot.wur.nl/460586).
- Hlatshwayo, M.S y P.K. Wahome. 2010. Effects of shading on growth, flowering and cut flower quality in carnation (*Dianthus caryophyllus*). J. Agric. Soc. Sci. 6(2):34-38. Disponible en: [http://fspublishers.org/jass/Issue.php?no\\_download=../published\\_papers/8942...pdf&issue\\_id=2962&y=2010&v\\_no=6&categoryID=84](http://fspublishers.org/jass/Issue.php?no_download=../published_papers/8942...pdf&issue_id=2962&y=2010&v_no=6&categoryID=84). Consulta: junio de 2020.
- Hofreiter A. y O.B. Lyshede. 2006. Functional leaf anatomy of *Bomarea* Mirb. (Alstroemeriaceae). Bot. J. Linn. Soc. 152(1):73-90. DOI: 10.1111/j.1095-8339.2006.00540.x.
- Ilić, Z.S., L. Milenković, L. Šunić y E. Fallik. 2014. Effect of coloured shade-nets on plant leaf parameters and tomato fruit quality. J. Sci. Food Agric. 95(13):2660-2667. DOI: 10.1002/jsfa.7000.
- Ilić, Z.S., L. Milenković, L. Šunić, S. Barać, J. Mastilović, Ž. Kevrešan y E. Fallik. 2017. Effect of shading by coloured nets on yield and fruit quality of sweet pepper. Zemdirbyste-Agr. 104(1):53-62. DOI: 10.13080/z-a.2017.104.008.
- Kaiser, E., A. Morales y J. Harbinson. 2018. Fluctuating light takes crop photosynthesis on a rollercoaster ride. Plant Physiol. 176(2):977-989. DOI: 10.1104/pp.17.01250.
- Kami, C., S. Lorrain, P. Hornitschek y C. Fankhauser. 2010. Light-regulated plant growth and development. Curr. Top. Dev. Biol. 91:29-66. DOI: 10.1016/S0070-2153(10)91002-8.
- Keren, N. y A. Krieger-Liszkay. 2011. Photoinhibition: molecular mechanisms and physiological significance. Physiol. Plantarum. 142(1):1-5. DOI: 10.1111/j.1399-3054.2011.01467.x.
- Kong, S. y K. Okajima. 2016. Diverse photoreceptors and light responses in plants. J. Plant Res. 129(2):111-114. DOI: 10.1007/s10265-016-0792-5.
- Kong, Y., K. Ratner, L. Avraham y Y. Shahak. 2017. Pearl netting improves photosynthetic light use associated with modification of structural and physiochemical traits of sweet pepper leaves. Acta Hort. 1170:337-344. DOI: 10.17660/ActaHortic.2017.1170.41.

- Kuczynska, P., M. Jemiola-Rzeminska y K. Strzalka. 2015. Photosynthetic pigments in diatoms. *Marine drugs*. 13(9):5847-5881. DOI: 10.3390/md13095847.
- Landis, T., J. Pinto y K. Dumroese. 2013. Light emitting diodes (LED): applications in forest and native plant nurseries. *Forest Nursery Notes*. 33(2):5-13. Disponible en: <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/43884>. Consulta: junio de 2020.
- Leite, C.A., R.M. Ito, G.T.S. Lee, R. Ganelevin y M.A. Fagnani. 2008. Light spectrum management using colored nets to control the growth and blooming of *Phalaenopsis*. *Acta Hortic.* 770:177-184. DOI: 10.17660/ActaHortic.2008.770.20.
- Leonardos, E.D., M.J. Tsujita y B. Grodzinski. 1994. Net carbon dioxide exchange rates and predicted growth patterns in *Alstroemeria* 'Jacqueline' at varying irradiances, carbon dioxide concentrations, and air temperatures. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 119(6):1265-1275. DOI: 10.21273/JASHS.119.6.1265.
- Leonardos, E.D., M.J. Tsujita y B. Grodzinski. 1996. The effect of source or sink temperature on photosynthesis and  $^{14}\text{C}$ -partitioning in and export from a source leaf of *Alstroemeria*. *Physiol. Plant.* 97(3):563-575. DOI: 10.1111/j.1399-3054.1996.tb00517.x.
- Li, J., G. Li, H. Wang y X. Wang. 2011. Phytochrome signaling mechanisms. *The Arabidopsis book*: Am. Soc. Plant. Biol. 9:e0148. DOI: 10.1199/tab.0148.
- Li, S.M., N.C. Rajapakse y R.Y. Young. 2003. Far-red light absorbing photoselective plastic films affect growth and flowering of chrysanthemum cultivars. *HortScience*. 38(2):284-287. DOI: 10.21273/HORTSCI.38.2.284.
- Li, X., W. Lu, G. Hu, X.C. Wang, Y. Zhang, G.X. Sun y Z. Fang. 2016. Effects of light-emitting diode supplementary lighting on the winter growth of greenhouse plants in the Yangtze River Delta of China. *Bot. Stud.* 57(2):1-8. DOI: 10.1186/s40529-015-0117-3.
- Li, Y., N. He, J. Hou, L. Xu, C. Liu, J. Zhang, Q. Wang, X. Zhang y X. Wu. 2018. Factors influencing leaf chlorophyll con-



- tent in natural forests at the biome scale. *Front. Ecol. Evol.* 6:64. DOI: 10.3389/fevo.2018.00064.
- Lichtenthaler, H.K., O. Wenzel, C. Buschman y A. Gitelson. 2006. Plant stress detection by reflectance and fluorescence. *Ann. NY. Acad. Sci.* 851(1):271-285. DOI: 10.1111/j.1749-6632.1998.tb09002.x.
- Lindén, A. y S. Mäntyniemi. 2011. Using negative binomial distribution to model overdispersion in ecological count data. *Ecology.* 92:1414-1421. DOI: 10.2307/23035094.
- Lin, C. y T. Todo. 2005. Protein family review. The cryptochromes. *Genome Biol.* 6:220. DOI: 10.1186/gb-2005-6-5-220.
- Lira, A. y A. Guevara. 2017. Irradiancia y radiancia. Facultad de Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible en: [http://leias.fa.unam.mx/wp-content/uploads/2018/07/180515\\_Practica15\\_LES.pdf](http://leias.fa.unam.mx/wp-content/uploads/2018/07/180515_Practica15_LES.pdf). Consulta: junio de 2020.
- Lyshede, O.B. 2002. Comparative and functional leaf anatomy of selected Alstroemeriaceae of mainly Chilean origin. *Bot. J. Linn. Soc.* 140(3):261-272. DOI: 10.1046/j.1095-8339.2002.00091.x.
- Massa, G.D., H.-H. Kim, R.M. Wheeler y C.A. Mitchell. 2008. Plant productivity in response to LED lighting. *Hortscience.* 43(7):1951-1956. DOI: 10.21273/HORTSCI.43.7.1951.
- Matloobi, M. 2012. Light harvesting and photosynthesis by the canopy. pp. 235-256. En: Najafpour, M.M. (ed.). *Advances in photosynthesis - fundamental aspects*. Londres: IntechOpen. 588p.
- Mendoza-Bautista, C., F. García, D. Rodríguez y S. Castro. 2011. Radiación solar y calidad de planta en una plantación de vara de perlilla (*Symphoricarpos microphyllus* H. B. K.). *Agrociencia.* 45(2):235-243. Disponible en: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-31952011000200008](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952011000200008). Consulta: junio 2020.
- Mohammed, G., T. Noland, D. Irving, P. Sampson, P. Zarco-Tejada y J. Miller. 2000. Natural and stress-induced effects on leaf spectral reflectance in Ontario species. *Forest research report*.156. Ontario: Ministry of Natural

- Resources. Disponible en: <https://digital.csic.es/handle/10261/10712>. Consulta: junio 2020.
- Monge, E., J. Val y L. Heras. 1984. Identificación de pigmentos en plantas superiores por cromatografía líquida de alta eficiencia en fase reversa. *An. Aula Dei.* 17(1-2):33-43. Disponible en: <http://digital.csic.es/handle/10261/11834>. Consulta: junio de 2020.
- Netto, A., E. Campostrini, J. Goncalves y R. Bressan-Smith. 2005. Photosynthetic pigments, nitrogen, chlorophyll *a* fluorescence and SPAD-502 readings in coffee leaves. *Sci. Hortic.* 104(2):199-209. DOI: 10.1016/j.scienta.2004.08.013.
- Nürnberg, D., J. Morton, S. Santabarbara, A. Telfer, P. Joliot, L. Antonaru, A. Ruban, T. Cardona, E. Krausz, A. Bous-sac, A. Fantuzzi y W. Rutherford. 2018. Photochemistry beyond the red limit in chlorophyll *f*-containing photosystems. *Science.* 360(6390):1210-1213. DOI: 10.1126/science.aar8313.
- O'Hara, R.B. y D.J. Kotze. 2010. Do not log transform count data. *Methods Ecol. Evol.* 1:118-122. DOI: 10.1111/j.2041-210X.2010.00021.x.
- Peñuelas, J. y L. Filella. 1998. Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. *Trends Plant Sci.* 3(4):151-156. DOI: 10.1016/S1360-1385(98)01213-8.
- Pérez-Urria C., E. 2009. Fotosíntesis: aspectos básicos. *Reduca (Biología).* Serie Fisiología Vegetal. 2(3):1-47. Disponible en: <http://www.revistareduca.es/index.php/biologia/article/view/793>. Consulta: junio de 2020.
- Petrova, S., K. Todorova, M. Dakova, E. Mehmed, B. Nikolov, I. Denev, M. Stratiev, G. Georgiev, A. Delchev, S. Stamenov y L. Firkova. 2017. Photosynthetic pigments as parameters/indicators of tree tolerance to urban environment (Plovdiv, Bulgaria). *Ecol. Balk.* 9(1):53-62. Disponible en: [http://web.uni-plovdiv.bg/mollov/EB/2017\\_vol9\\_iss1/053-062\\_eb.16133.pdf](http://web.uni-plovdiv.bg/mollov/EB/2017_vol9_iss1/053-062_eb.16133.pdf). Consulta: junio de 2020.
- Pierantoni, M., R. Tenne, V. Brumfeld, V. Kiss, D. Oron, L. Addadi y S. Weiner. 2017. Plants and light manipulation:



- the integrated mineral system in okra leaves. *Adv. Sci.* 4(5):1-9. DOI: 10.1002/advs.201600416.
- Pierantoni, M., R. Tenne, B. Rephael, V. Brumfeld, A. van Casteren, K. Kupeczik, D. Oron, L. Addadi y S. Weiner. 2018. Mineral deposits in *Ficus* leaves: morphologies and locations in relation to function. *Plant Physiol.* 176(2):1751-1763. DOI: 10.1104/pp.17.01516.
- Powles, S. 1984. Photoinhibition of photosynthesis induced by visible light. *Annu. Rev. Plant. Physiol.* 35(1):15-44. DOI: 10.1146/annurev.pp.35.060184.000311.
- Prasad, P. 2003. Introduction to biophotonics. 1.<sup>a</sup> ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. 593p.
- Quail, P. 2002. Phytochrome photosensory signalling networks. *Nat. Rev. Mol. Cell Bio.* 3(2):85-93. DOI: 10.1038/nrm728.
- R Core Team. 2019. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for statistical computing. Viena, Austria. Disponible en: <http://www.R-project.org/>.
- Rajapakse, N.C., R.E. Young, M.J. McMahon y R. Oi. 1999. Plant height control by photoselective filters: current status and future prospects. *Horttechnology.* 9(4):618-624. DOI: 10.21273/HORTTECH.9.4.618.
- Rodríguez, M. y D. Morales. 2015. Efecto de mallas sombreadoras sobre la producción y calidad de frutos de arándano (*Vaccinium corymbosum* L.) cv. Brigitta. *Sci. Agrop.* 6(1):41-50. DOI: 10.17268/sci.agropecu.2015.01.04.
- Rstudio Team. 2015. Rstudio: Integrated Development for R. rstudio, Inc., Boston, MA. Disponible en: <https://rstudio.com/products/rstudio/>. Consulta: junio de 2020.
- Runkle, E. y B. Bugbee. 2013. Problems with foot-candles, lux and lumens. *Greenhouse Product News.* 23(9):78. Disponible en: <https://www.canr.msu.edu/uploads/resources/pdfs/footcandles-lux-lumens2.pdf>. Consulta: junio de 2020.
- Sabater, F. 1977. La luz como factor ambiental para las plantas. *Anuales de la Universidad de Murcia.* 31:1-24. Disponible en: <https://revistas.um.es/analesumciencias/article/view/102821>. Consulta: junio de 2020.

- Saga, Y. y H. Tamiaki. 2012. Demetalation of chlorophyll pigments. *Chem. Biodivers.* 9(9):1659-1683. DOI: 10.1002/cbdv.201100435.
- Sanso, A.M., M. Camargo de Assis y C.C. Xifreda. 2005. *Alstroemeria*: a charming genus. *Acta Hortic.* 683:63-78. DOI: 10.17660/ActaHortic.2005.683.5.
- Shahak, Y. 2008. Photo-selective netting for improved performance of horticultural crops. A review of ornamental and vegetable studies carried out in Israel. *Acta Hortic.* 770:161-168. DOI: 10.17660/ActaHortic.2008.770.18.
- Shahak, Y. 2014. Photosensitive netting: an overview of the concept, research and development and practical implementation in agriculture. *Acta Hortic.* 1015:155-162. DOI: 10.17660/ActaHortic.2014.1015.17.
- Shahak, Y., E.E. Gussakosky, E. Gal y R. Ganelevin. 2004. ColorNets: crop protection and light-quality manipulation in one technology. *Acta Hortic.* 659(659):143-151. DOI: 10.17660/ActaHortic.2004.659.17.
- Shahak, Y., E. Gal, Y. Offir y D. Ben-Yakir. 2008. Photosensitive shade netting integrated with greenhouse technologies for improved performance of vegetable and ornamental crops. *Acta Hortic.* 797(8):75-80. DOI: 10.17660/ActaHortic.2008.797.8.
- Shahak, Y., K. Ratner, Y.E. Gille, N. Zur, E. Or, E.E. Gussakovsky, R. Stern, P. Sarig, E. Raban, E. Hancavi, I. Doron y Y. Greenblat-Avron. 2008. Improving solar energy utilization, productivity and fruit quality in orchards and vineyards by photosensitive netting. *Acta Hortic.* 772(7):65-72. DOI: 10.17660/ActaHortic.2008.772.7.
- Shibayama, M. 2004. Seasonal profiles of polarized reflectance and leaf inclination distribution of wheat Canopies. *Plant. Prod. Sci.* 7(4):397-405. DOI: 10.1626/pp.s.7.397.
- Shibayama, M. y Y. Watanabe. 2007. Estimating the mean leaf inclination angle of wheat canopies using reflected polarized light. *Plant. Prod. Sci.* 10(3):329-342. DOI: 10.1626/pp.s.10.329.
- Shibayev, P. y R. Pergolizzi. 2011. The effect of circularly polarized light on the growth of plants. *Int. J. Bot.* 7(1):113-117. DOI: 10.3923/ijb.2011.113.117.





- Somers, D.E. y S. Fujiwara. 2009. Thinking outside the f-box novel ligands for novel receptors. *Trends Plant Sci.* 14(4):206-213. DOI: /10.1016/j.tplants.2009.01.003.
- Stamps, R.H. y A.L. Chandler. 2008. Differential effects of colored shade nets on three cut foliage crops. *Acta Hort.* 770(770):169-176. DOI: 10.17660/ActaHortic.2008.770.19.
- Taiz, L. y E. Zeiger. 2015. *Plant physiology and development*. 6.<sup>a</sup> ed. Sunderland: Sinauer Associates Publisher. 700p.
- Tinyane, P., D. Sivakumar y P. Soundy. 2013. Influence of photo-selective netting on fruit quality parameters and bioactive compounds in selected tomato cultivars. *Sci. Hort.* 161:340-349. DOI: 10.1016/j.scienta.2013.06.024.
- Tokutomi, S., D. Matsuoka y K. Zikihara. 2008. Molecular structure and regulation of phototropin kinase by blue light. *Biochim. Biophys.* 1784(1):133-142. DOI: 10.1016/j.bbapap.2007.09.010.
- Tooulakou, G., A. Giannopoulos, D. Nikolopoulos, P. Bresta, E. Dotsika, M.G. Orkoulas, C.G. Kontoyannis, C. Fasseas, G. Liakopoulos, M.I. Klapa y G. Karabourniotis. 2016. Alarm photosynthesis: calcium oxalate crystals as an internal CO<sub>2</sub> source in plants. *Plant Physiol.* 171(4):2577-2585. DOI: 10.1104/pp.16.00111.
- Tyystjarvi, E. 2013. Photoinhibition of photosystem II. *Int. Rev. Cell. Mol. Biol.* 300(C):243-303. DOI: 10.1016/j.bba-bio.2006.11.019.
- Woolley, J. 1971. Reflectance and transmittance of light by leaves. *Plant Physiol.* 47(5):656-662. DOI: 10.1104/pp.47.5.656.
- Xu, Y. 2016. Seven dimensions of light in regulating plant growth. *Acta Hort.* 1134(1134):445-452. DOI: 10.17660/ActaHortic.2016.1134.56.



# *Rosen Tantau*

*Rose breeding is our profession since 1906*



## *Country Spirit® Roses*

**Kilómetro 31 Vía Bogotá - Facatativá  
Facatativá - Cundinamarca - Colombia**

**Tel. (57 1) 891 1600**

**Cel.: (57) 311 598 6556 • 312 449 7988**

**[rzapata@ronsentantau.com](mailto:rzapata@ronsentantau.com)**

**[rosencol@ronsentantau.com](mailto:rosencol@ronsentantau.com)**

**[www.ronsentantau.com](http://www.ronsentantau.com)**



# 8

## CAPÍTULO



# Fundamentos de la floración mediada por luz y potencialidades de las mallas fotoselectivas y huellas espectrales en floricultura\*

**María Camila Páez Olarte<sup>1</sup>, Víctor Julio Flórez Roncancio<sup>2</sup>  
y Joaquín Guillermo Ramírez-Gil<sup>3</sup>**

## RESUMEN

**La floricultura es un sector** de importancia en Colombia, no solo por su capacidad para generar empleo y desarrollo rural, sino por tratarse de una agroindustria que ha solucionado los rezagos tecnológicos en función del uso de alternativas innovadoras. Con base en esto, y entendiendo que para este sector uno de los temas de mayor trascendencia y que más se ha estudiado ha sido la luz y los procesos que gobierna, el objetivo de este capítulo fue abordar los fundamentos teóricos asociados al desarrollo vegetal tras las novedosas estrategias de manipulación del ambiente luminoso y el uso de tecnologías emergentes en horticultura. Se incluyen temas de floración: el fotoperiodo, la regulación hormonal y las teorías del control de la floración, con el reciente descubrimiento de las proteínas FT, que revive el concepto del florigeno, de la misma forma que las características y funciones de los fotorreceptores. Igualmente, se presentan

255

\* Para citar este capítulo: Páez O., M.C., V.J. Flórez R. y J.G. Ramírez-Gil. 2021. Fundamentos de la floración mediada por luz y potencialidades de las mallas fotoselectivas y huellas espectrales en floricultura. En: Flórez R., V.J. (ed.). Productos relevantes del proyecto Fortalecimiento de la competitividad del sector floricultor colombiano mediante el uso de ciencia, tecnología e innovación aplicadas en Cundinamarca. Bogotá: Ediciones Unisalle, Ceniflores. pp. 254-295.

1. Ingeniera agrónoma, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Correo electrónico: mcpaezo@unal.edu.co - ORCID: 0000-0001-9017-8328.

2. Ingeniero agrónomo, Universidad Federal de Rio Grande del Sur – UFRRS. Doctor en Ciencias, Universidad Estatal de Campinas – UNICAMP. Profesor asociado, Departamento de Agronomía, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Correo electrónico: vjflorezr@unal.edu.co - ORCID: 0000-0002-3081-2400.

3. Ingeniero agrónomo, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Doctor en Ciencias Agrarias-Biomodelation, Universidad Nacional de Colombia-The University of Kansas. Profesor asistente, Departamento de Agronomía, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Correo electrónico: jgramireg@unal.edu.co - ORCID: 0000-0002-0162-3598.



datos sobre el uso de mallas fotoselectivas en cultivos en invernadero. Por otra parte, se plantea una aproximación teórica y práctica del potencial uso para el sector floricultor de una tecnología emergente: las huellas espectrales. En lo que respecta al uso de las mallas fotoselectivas, se encontró la malla de color rojo al 30 % de sombrío (R30) como la de mayor potencial en razón a que mantuvo el número de tallos por planta e incrementó la longitud, el diámetro y la masa seca del tallo floral, contrastante con la malla roja al 40 % de sombrío, la cual redujo significativamente el número de tallos, el diámetro y el número de hojas de los tallos florales. Con R30 se obtuvieron los valores más altos en los grados de calidad 70s y 80s.

**Palabras clave:** *espectro de transmitancia, horticultura intensiva, malla perla, malla roja, Rosa x hybrida L.*

## ABSTRACT

**Floriculture is an important sector** in Colombia, not only for its ability to generate employment and rural development, but also because it is an agribusiness that has solved technological lags based on the use of innovative alternatives. According to, and understanding that for this sector the light and the processes that it govern is one of the most important and studied issues, the goal of this chapter is to address the theoretical bases associated with plant development based on innovative strategies for manipulating the luminous environment and the use of emerging technologies in horticulture. We included topics associated with flowering: photoperiod, hormonal regulation and theories of flowering control, with the recent discovery of FT proteins, which revives the concept of florigen; in the same way, the characteristics and functions of photoreceptors. Likewise, data on the use of photoselective nets in greenhouse crops are presented. On the other hand, is proposed a theoretical and practical approach to the potential use of spectral indices as an emerging technology for the floricultural sector. Regarding the use of photoselective nets, the 30 % shade red net (R30) was found to be the one with the greatest potential

because it maintained the number of stems per plant and increased length, diameter and the dry mass of the flowering stems, contrasting with the 40 % shade red net, which significantly reduced the number of stems, the diameter and the number of leaves of the flowering stems. With R30 the highest values were obtained in the quality grades 70s and 80s.

**Keywords:** *transmittance spectrum, intensive horticulture, pearl net, red net, Rosa x hybrida L.*



# Introducción

El sector floricultor colombiano responde por el 16 % del total de las exportaciones, y ocupa el segundo lugar a nivel mundial, con lo que generó alrededor de USD \$ 1460 millones en 2018. En el país se cultivan cerca de 7700 hectáreas, con una producción aproximada de 250 000 toneladas, sobre todo en Cundinamarca, con un 66 %, y Antioquia, con un 32 % (Asocolflores, 2018). La floricultura se ha caracterizado por ser uno de los sistemas de producción de mayor innovación, y gracias a ello ha mantenido la producción y productividad en aumento; además, ha logrado adaptarse a los diferentes cambios en el tiempo, ya sean técnicos o del mercado. En la actualidad, las exportaciones de rosa ocupan el primer lugar, con el 20,5 % del volumen en toneladas totales y 304 267 millones de dólares, es decir, el 36,3 % del valor total exportado (DANE, 2017; Reyes *et al.*, 2017). Entre los cultivares de rosa sembrados se destaca el cultivar Freedom, caracterizado por ser robusto y resistente a enfermedades, larga vida en florero y puede alcanzar una productividad de 1,2 tallos por planta por mes (Rosen Tantau, 2018).

En la literatura, el fenómeno de la floración está descrito desde la sincronización de las plantas con las variables ambientales, el efecto del fotoperiodo, los eventos bioquímicos en hoja y domo apical, las interacciones cuantitativas entre auxinas y citoquininas, el efecto antagónico citoquinas-ABA que asigna funciones a las hormonas, el planteamiento de la regulación hormonal basada en el florigeno, las teorías del control multifactorial para la transición floral hasta el descubrimiento de las proteínas FT. En su condición de inmovilidad, las plantas desarrollaron estrategias para adaptarse a las condiciones ecológicas reinantes en su entorno, como la radiación solar. La longitud de onda del espectro es esencial para la fotosíntesis; sin embargo, según su intensidad puede ser dañina, en función de la condición fisiológica y ambiental de la planta. Por tal motivo, las plantas han perfeccionado mecanismos para detectar las longitudes de onda y su intensidad, lo que permite optimizar su crecimiento y desarrollo, así como minimizar posibles daños. Las plantas desarrolla-

ron fotorreceptores para detectar y monitorear las longitudes de onda y su intensidad, entre ellos los fitocromos, que detectan rojo (R) y rojo lejano (RL) (600-750 nm) (Li *et al.*, 2015), las fototropinas, junto con los criptocromos, que detectan UV y luz azul (Meisel *et al.*, 2011), el UVR8, fotorreceptor de luz UV-B, y las proteínas Zeitlupe (ZTL), Kelch unido a Flavina (FKF1) y LOV Kelch (LKP2/FKL1) que forman una familia de fotorreceptores de luz UV-A y de luz azul (Miyazaki *et al.*, 2015; Huché-Thélier *et al.*, 2016).

Entre los manejos agronómicos que permiten un mejor rendimiento productivo de las plantas se encuentran el uso e implementación de pantallas o cubiertas térmicas, las cuales pueden ser de diversos materiales, con o sin aperturas, y utilizadas con diferentes fines, entre ellos el empleo de mallas de sombrío o mallas fotoselectivas; estas modifican el espectro de luz, alterando en las plantas sus relaciones R/RL, y produciendo efectos positivos en la eficiencia y producción agrícola. En la horticultura protegida se destaca el uso de mallas plásticas para sombrear; esta técnica disminuye la intensidad de la radiación y evita incrementos de temperatura durante periodos cálidos (Valera *et al.*, 2001). La malla de color negro es la más utilizada en el mercado por su bajo costo; sin embargo, es poco selectiva a la calidad de la luz debido a que sombrear por igual en toda la banda del espectro electromagnético, lo cual causa una disminución en la fotosíntesis y el rendimiento.

En los últimos años se han desarrollado nuevas mallas fotoselectivas que modifican las propiedades de la luz en razón a que aumentan la transmitancia principalmente en el espectro visible correspondiente al color de la malla. Esta tecnología permite aumentar la radiación en regiones espectrales de la radiación solar dependiendo del color de la malla o aumentar la transformación de luz directa a luz dispersa (Shahak, 2008), y activan o inactivan mecanismos fotoselectivos sofisticados para capturar la energía lumínica lo que a su vez afecta procesos de crecimiento y diferenciación. Las investigaciones acerca de la manipulación del ambiente luminoso se han orientado a promover la transmitancia de regiones espectrales del azul, rojo, y rojo lejano conocidas por



Entre los fotorreceptores en plantas se tienen en cuenta miembros de las familias de fitocromos, criptocromos, fototropinas, el UVR8, y las proteínas Zeitlupe.







Los causales  
de estrés y de  
respuestas  
diferenciales  
en plantas  
pueden inducir  
modificaciones,  
que a través de  
propiedades  
ópticas  
diferenciales,  
pueden convertirse  
en marcadores de  
una determinada  
condición de la  
planta.

desencadenar respuestas de los fotorreceptores de la planta (Aleric y Kirkman, 2005).

Las huellas espectrales, la medición de la fluorescencia y las diferencias térmicas captadas por distintos tipos de sensores son la respuesta a múltiples interacciones. Los causales de estrés, y de respuestas diferenciales en plantas pueden inducir modificaciones en el color del tejido y forma de la hoja, tasa de transpiración, morfología y densidad del dosel del cultivo, así como variación en la interacción de radiación solar con las plantas (West *et al.*, 2003). Estos cambios resultan en propiedades ópticas diferenciales que pueden evaluarse y convertirse en marcadores de una determinada condición de la planta (Mahlein *et al.*, 2012). Por otra parte, la reflectancia de las hojas es sensible al estrés de la planta debido a cambios en la pigmentación, reacción hipersensible y degradación de la pared celular (Blackburn, 2007; Chaerle *et al.*, 2007; Chaerle *et al.*, 2009), cambios asociados a modificaciones en la cantidad e intensidad de la luz, inducen este tipo de comportamiento.

Con el uso de estos sensores con capacidad de captar la reflectancia de la luz por parte de las plantas se pueden obtener dos tipos de datos: imágenes con información en cada pixel asociada a índices de vegetación o bandas espectrales asociadas a reflectancias que se pueden relacionar con la presencia y cuantificación de una respuesta específica, asociada a un factor de estrés o una característica particular en las plantas (Lowe *et al.*, 2017).

El objetivo del presente capítulo es revisar los conceptos básicos sobre los aspectos que influyen el fenómeno de la floración mediado por luz, informar a los horticultores sobre la tecnología del uso de mallas fotoselectivas en la manipulación del ambiente luminoso, y el potencial que presentan las huellas espectrales para esta importante agroindustria. También se muestran los resultados de un proceso de investigación relacionado con crecimiento, productividad y calidad de rosa cv. Freedom cultivada en condiciones de invernadero bajo influencia de la tecnología de las mallas fotoselectivas.

## 8.1 Aspectos fundamentales de la floración en plantas mediados por la luz

### 8.1.1 La radiación solar

De la cantidad de energía irradiada por el sol, solo una pequeña fracción incide sobre la atmósfera terrestre (ca.  $1379 \text{ W m}^{-2}$ ); esta, conocida como constante solar, está compuesta por radiación ultravioleta (UV), radiación visible y radiación infrarroja (IR). La mayor parte de las radiaciones UV e IR es absorbida por los gases de la atmósfera: UV por el ozono ( $\text{O}_3$ ) e IR por el vapor de agua y el  $\text{CO}_2$ . Así, la radiación solar que llega a la biosfera posee una proporción mayor de radiación visible que aquella que llega a la parte superior de la atmósfera. La radiación UV alcanza solo alrededor de 2 %, la IR 53 % y la visible alrededor de 45 % (Meisel *et al.*, 2011).

La radiación UV que llega a la estratosfera del planeta se divide en tres bandas: UV-A (320-400 nm), UV-B (280-320 nm) y UV-C (200-280 nm) (Karentz, 1991). Solo una pequeña fracción de UV-B logra pasar a la biosfera, la cual, junto a la totalidad de la radiación UV-A, más la correspondiente a la radiación visible (400 a 700 nm), forman parte del espectro foto percibido por los organismos. Un hecho importante es la llegada a la biosfera de un máximo de radiación de longitud de 680 nm, que coincide con la banda roja de absorción de la clorofila. En este sentido se conoce como radiación fotosintéticamente activa (PAR) a aquella entre los 400 y 700 nm, rango similar al de la radiación visible. En la tabla 8.1 se indican de manera general los principales efectos que en las plantas producen las longitudes de ondas del espectro electromagnético y los fotorreceptores involucrados en su detección (Meisel *et al.*, 2011).

261

### 8.1.2 Fotoperiodo y floración

Considerando que los individuos de una determinada especie de planta requieren sincronizar la floración para



 **Tabla 8.1** Acciones y efectos de luz de diferentes longitudes de onda.

TIPO DE LUZ	$\lambda$ (nm)	ACCIONES Y EFECTOS	TIPO DE FOTORRECEPTOR Y OTRAS MOLÉCULAS QUE ABSORBEN LA ENERGÍA LUMÍNICA
UV-C	< 280	Mutaciones, daño y muerte celular	DNA- RNA
UV-B/UV-A	315-400	Acción fotomorfológica; síntesis de pigmentos; daño y muerte celular	Criptocromos, Fotorreceptores uv
Violeta - Azul	400-510	Acción fotosintética, fotomorfogénesis, ritmo circadiano, tiempo de floración, fototropismo, movimiento de cloroplastos, apertura de estomas, estimulación de la síntesis de clorofila y carotenos	Fotosistemas (clorofilas a y b), Criptocromos, Fototropinas
Verde - Amarillo	510-610	Acción reducida sobre la fotosíntesis	Carotenos
Anaranjado -Rojo / Rojo lejano	610-1000	Acción fotosintética, germinación de semillas, tiempo de floración, ritmo circadiano, fotomorfogénesis, elongación celular	Fotosistemas (clorofilas a y b), Fotocromos
Infrarrojo	> 1000	Efectos mínimos, poco estudiados	Desconocido

FUENTE: adaptado de Meisel et al. (2011)

garantizar el cruzamiento, y que además deben completar su reproducción sexual en condiciones externas favorables, la mayoría de las plantas usa las señales ambientales para regular su transición hacia la floración. Los factores potenciales para controlar esta transición son las variables ambientales que muestran cambios estacionales regulares; los más importantes son el fotoperiodo, la temperatura y la disponibilidad de agua. Las denominadas “plantas autónomas”, es decir, aquellas que no requieren un fotoperiodo determinado o una temperatura específica para florecer, normalmente son sensibles a la irradiancia. Los factores ambientales son percibidos por las diferentes partes de la planta: el fotoperiodo y la radiación principalmente por las hojas maduras; la temperatura por la planta entera, aunque la temperatura baja (vernalización) se percibe principalmente por el ápice vegetativo, y la disponibilidad de agua por el sistema radical. Existe una interacción fuerte entre los diferentes factores; sin embar-

go, cada factor puede modificar el valor límite para la acción efectiva de los otros factores (Bernier *et al.*, 1993).

Para designar la respuesta de las plantas a la longitud del día, Garner y Allard (1923) sugirieron el término “fotoperiodismo”, clasificando las especies por ellos estudiadas en plantas de día largo (PDL) y plantas de día corto (PDC), donde la floración es ocasionada por la acción de DL o DC, respectivamente. Se definen como PDL aquellas que solamente florecen o lo hacen más rápidamente o con mayor intensidad cuando reciben luz por cierto número de horas mayor que un determinado periodo (fotoperiodo crítico) en cada ciclo de 24 h, y cuando dichos periodos son menores que los valores críticos se les conoce como de días cortos (Raven *et al.*, 1992). En plantas de respuesta fotoperiódica cuantitativa, una determinada longitud del día promueve, mas no es esencial para la floración (Vince-Prue, 1975; Metzger, 1995; Thomas, 1993).

De acuerdo con Vince-Prue (1975), los eventos bioquímicos de la iniciación floral pueden ser divididos entre aquellos que ocurren en las hojas y llevan a la producción del estímulo (o inhibidor) floral y los que ocurren en la llegada del estímulo floral al ápice. El término *inducción fotoperiódica* sería usado para el proceso que ocurre en la hoja, y *evocación*, para los eventos que ocurren en el ápice, en el periodo entre la llegada del estímulo floral y el apareamiento de la primera señal morfológica que caracteriza la floración.

En los procesos de morfogénesis se busca encontrar los factores que rigen la formación de los órganos, su crecimiento y desarrollo. Entre tanto, la teoría de una sustancia formadora de órganos se abolió definitivamente cuando Skoog y Miller (1957), en cultivo *in vitro*, demostraron interacciones cuantitativas entre factores de crecimiento, AIA (ácido indol-3-acético, una auxina) y KI (quinetina, sustancia con actividad citoquinínica), estableciendo un mecanismo común de regulación de los tipos de crecimiento, desde la elongación celular hasta la formación de órganos. Luego, con base en el efecto antagónico citoquinas-ABA (ácido abscísico), principalmente en el control de la germinación de semillas y en la quiebra de la dominancia apical, Khan (1975) estableció un modelo de acción que asigna funciones a las hormonas. En



Las denominadas “plantas autónomas”, aquellas que no requieren un fotoperiodo determinado o una temperatura específica para florecer, normalmente son sensibles a la irradiancia.





En la última década, con el descubrimiento de las proteínas FT se revivió el concepto del florigeno. Son pequeñas proteínas, globulares, capaces de moverse hasta el ápice para actuar como potentes estimuladores de la floración en plantas.

este modelo, una determinada hormona tendría un papel primario para la germinación o el crecimiento, mientras que las otras clases de hormonas tendrían roles secundarios, esencialmente preventivos y permisivos; por lo tanto, las hormonas actuarían de manera selectiva en el control del proceso morfogénico.

Chaïlakhyan (1985) sostuvo que la regulación hormonal de la floración se basaba en el concepto de florigeno como un sistema complementario constituido por dos grupos de hormonas: las giberelinas, que influyen en la formación de tallos florales, y las antesinas, que tienen incidencia en la formación de flores; sin embargo, aún se desconoce la naturaleza química y estructural de las antesinas. La teoría que luego fue más aceptada para el control de la transición floral fue la del control multifactorial propuesta por Bernier *et al.* (1993), donde varias sustancias químicas, asimilados y fitohormonas participaban en la inducción floral. En el modelo fisiológico propuesto con la PDL *Sinapis alba*, los compuestos involucrados son carbohidratos, citoquininas, auxinas, poliaminas y  $\text{Ca}^{++}$ . Es evidente que estas señales podrían no estar involucradas en otras especies; por ejemplo, en *Lolium temulentum*, una PDL, la acumulación de sacarosa no parecía ser parte del sistema de señalización floral, mientras que algunas giberelinas se encontraban entre las señales promotoras producidas y exportadas por las hojas inducidas. En *Arabidopsis*, también una PDL, la movilización de almidón, y en consecuencia la disponibilidad de sacarosa, parecía esencial pero no estaría actuando de forma aislada. Una o más giberelinas se incluirían entre las señales primarias responsables de la transición. Otros factores, como ABA, también podrían estar involucrados. Años después, Bernier y Périlleux (2005) establecieron como factores altamente predecibles o factores primarios a la longitud del día (fotoperiodismo) y al frío de invierno (vernalización); como factores moderadamente predecibles o secundarios a la temperatura ambiente, la irradiancia y la disponibilidad de agua, e impredecibles o factores terciarios a la disponibilidad de nutrientes, a la calidad de luz y a la vegetación vecina. También establecieron una clasificación de factores capaces de sustituir al factor primario

en el control del momento de la floración. En *Sinapis alba* analizaron la savia xilemática y floemática en plantas inducidas a floración, mostrando el complejo circuito tallo-raíz-tallo que involucra nutrientes y hormonas en el control de la floración de dicha especie.

Finalmente, hace una década, con el descubrimiento de las proteínas FT (Taoka *et al.*, 2013) se revivió el concepto del florigeno, regulador universal de la floración a larga distancia propuesto por Chailakhyan en la década de 1930. Las proteínas FT (*FT-like proteins*) son pequeñas proteínas (~175 aa), globulares, dependientes de fosfatidiletanolamina (PEBP), expresadas en el floema, transmisibles por injertos y capaces de moverse hasta el ápice para actuar como potentes estimuladores de la floración en plantas. En el modelo de acción para la regulación de la floración fotoperiódica Taoka *et al.* (2013) indican que en días inductivos se produce florigeno (proteína FT) en las células compañeras del tejido vascular. FT interactúa con FT-INTERACTING PROTEIN1 (FTIP1) en el retículo endoplásmico y es translocado a los elementos cribosos, en donde se transporta hacia el meristemo apical del tallo o brote (SAM, por sus siglas en inglés) a través del floema. En las células del SAM, FT interactúa con la proteína 14-3-3 en el citoplasma, y, luego el complejo FT-14-3-3 ingresa al núcleo e interactúa con un factor de transcripción (FD). Resulta el complejo de activación del florigeno, FAC, por sus siglas en inglés (FT-14-3-3- FD), el cual se une a las regiones promotoras de genes de identidad en el meristemo floral (por ejemplo, AP1), activando así su expresión génica para promover la floración.

265

### 8.1.3 Fitocromo

Los fitocromos son pigmentos azules-verdes típicos presentes en las plantas, que absorben luz en el espectro del rojo (660 nm), rojo lejano (730 nm) y la luz azul (380-475 nm) (Li *et al.*, 2015; Franklin, 2016). Por tanto, coexisten dos formas de fitocromo: Pr, que se observa después de la exposición a luz rojo lejano (fr) y es la forma inactiva, y Pfr luego de la exposición a luz roja (r), forma activa. El fitocromo es



sintetizado en la oscuridad y primero existe únicamente como Pr (o P660, forma inactiva), que con la exposición a luz de longitud de onda de 660 nm (rojo) se transforma a fitocromo Pfr (P730, forma activa). Este Pfr retorna a su forma inactiva Pr por la exposición a luz de longitud de onda de 730 nm. La luz incidente  $R_L$  también proviene del reflejo del tejido verde de otras plantas (Uliasz y Vierstra, 2011; Etchevers, 2016). Se trata de una proteína dimérica, con dos subunidades idénticas, con pesos moleculares de 120 000 a 127 000 Da, cada una. Las cadenas de polipéptidos del fitocromo se encuentran entre las más largas cadenas de polipéptidos en las plantas. El fitocromo también contiene un dominio parecido a las proteínas kinasas, que ejerce autofosforilación; y, el cromóforo, al recibir luz roja o infrarroja sufre una isomerización *cis-trans*, que induce cambios conformacionales en la proteína (Klement *et al.*, 2019).

El fitocromo pertenece a una familia de proteínas con al menos cinco subfamilias: PHYA, PHYB, PHYC, PHYD y PHYE (Li *et al.*, 2015). Las más conocidas son las formas del tipo I (PHYA), que presentan una forma Pfr altamente inestable (se destruye tras 1-2 h de iluminación con luz roja) y puede ejercer su acción en estados fotoestacionarios bajos. El fitocromo del tipo II (PHYB) tiene una forma Pfr mucho más estable, y actúa cuando se encuentra en proporciones elevadas (Pham *et al.*, 2018). En plantas etioladas, la proporción de fitocromo tipo I es mayor; en las plantas verdes la proporción de ambos puede ser la misma o el fitocromo tipo II puede ser el dominante.

Aunque los fitocromos actúan en plantas verdes, las plantas etioladas presentan 10 a 100 veces más cantidad de fitocromos totales que las plantas bajo la luz. En oscuridad, el Pr se acumula en el citoplasma hasta alcanzar un cierto nivel de equilibrio entre la síntesis y una lenta degradación. Si bien la transformación a Pfr luego de exposición a luz roja es un proceso rápido, la forma Pfr es muy inestable, y el nivel del fitocromo en la célula puede caer hasta 1 a 2 % del nivel original, lo que representa un nuevo equilibrio entre la síntesis de Pr y degradación de Pfr. En oscuridad, la acumulación de fitocromo se incrementa de nuevo debido a la nueva síntesis de Pr. El fitocromo se concentra en las zonas que generan los

mayores cambios de desarrollo, como los meristemos apicales del epicótilo y de la raíz, las yemas, o el ápice del coleóptilo en cereales, los tejidos jóvenes con células indiferenciadas y etioladas (Bose *et al.*, 2018).

En Inoue *et al.* (2017) y Bose *et al.* (2018) se reportan tres categorías de respuesta de los fitocromos en función del nivel de luz:

- (i) VLFR - respuestas a fluencia muy baja,  $< 0,0001 \mu\text{mol m}^{-2}$  fotones (convierte 0,01 % del fitocromo). Precisan de una cantidad muy pequeña de luz roja para iniciarse, como en la estimulación del crecimiento del epicótilo en plantas etioladas o la inducción de la germinación de semillas de algunas especies, tal como *Arabidopsis*. Una vez inducidas, las respuestas a muy baja fluencia no son fotorreversibles (Song y Choi, 2019);
- (ii) LFR - respuestas a fluencia baja,  $1-1000 \mu\text{mol m}^{-2}$  fotones. La mayoría de las respuestas del fitocromo son de este tipo. Estimulación de la germinación en lechuga, síntesis de clorofila (regulación del gen *HEMA1* que codifica glutamil tRNA reductasa) o el movimiento foliar. Son respuestas reversibles;
- (iii) RAI - respuestas a alta irradiancia,  $>1000 \mu\text{mol m}^{-2}$  fotones, radiación continua. Estas respuestas son irreversibles y proporcionales a la intensidad de luz: síntesis de antocianinas, inducción de la floración en algunas especies, apertura del gancho plumular o la expansión de cotiledones.

#### 8.1.4 Receptores de luz azul y uv

La luz azul y la luz UV reducen la elongación de entrenudos, estimulan la producción de antocianinas e intensifican la coloración de flores. La luz azul fomenta la síntesis de carotenoides y clorofilas en algas, y en algunas plantas marinas influye sobre el desarrollo de tilacoides. Los criptocromos y las fototropinas son fotorreceptores que responden a la luz con ondas diferentes de rojo y del rojo lejano, y ambos



Las formas más conocidas de fitocromo son las del tipo I (PHYA) y las del tipo II (PHYB), que presentan una forma Pfr altamente inestable y una forma Pfr mucho más estable, respectivamente.







Teniendo en cuenta UVR8 como un fotorreceptor de luz UV-B caracterizado recientemente, las plantas hacen uso de por lo menos trece fotorreceptores, que incluyen cinco fitocromos (PHYA-E), dos fototropinas (PHOT1 y PHOT2), dos criptocromos (CRY1 y CRY2), y tres miembros de la familia Zeittlupe (ZTL, FKF1 y LKP2).

modulan el sistema del fitocromo. Su existencia le permite a la planta reaccionar a las condiciones de luz de su hábitat. Los zeitlupinos ZEITLUPE (ZTL) también son fotorreceptores que responden a la luz azul (Miyazaki *et al.*, 2015).

Los *criptocromos* son receptores de luz azul (450 nm), luz UV-A (355-366 nm) y posiblemente luz verde (500-550 nm) (Wang *et al.*, 2013). Se componen de proteínas solubles de 70-80 kDa, cuyos dominios terminales son amino (relacionado con la estructura de fotoliasa) y carboxilo (sin analogía en la secuencia de aminoácidos con otras proteínas). La parte proteica de los criptocromos se parece a DNA-fotoliasa, una enzima que repara los daños al DNA producidos por la luz UV (Wang *et al.*, 2015). También presenta dos cromóforos: uno responsable de la absorción de luz, folato (meteniltetrahidrofolato, derivado de pterina) o diazoflavina, y otro catalítico, flavín-adenín-dinucleótido (FAD). Las respuestas a la luz azul son diferentes, entre ellas: fototropismo, por alteración de los niveles de auxinas; estimulación de la apertura estomática; movimiento de hojas siguiendo al sol; movimiento de cloroplastos en la célula y activación de ciertos genes relacionados con el crecimiento. Los mecanismos de acción varían dependiendo del efecto fisiológico producido. La fosforilación proteica es responsable de las diferentes concentraciones de auxinas presentes durante el fototropismo, y la estimulación de una  $H^+$ -ATPasa induce los cambios osmóticos en las células guarda de estomas, causando su apertura. Asimismo, la luz azul provoca cambios en el metabolismo de azúcares en células guarda inhibiendo la síntesis de almidón y estimulando la formación de malato. Se han identificado en plantas dos criptocromos con funciones similares; en *Arabidopsis*, los dos genes para criptocromo son CRY1 y CRY2. Fueron los primeros receptores de luz azul separados y caracterizados en organismos y descubiertos primero en plantas. CRY1 es estable en la luz y actúa bajo luz azul intensa, mientras que CRY2 es importante en bajas intensidades de luz azul ( $1 \mu\text{mol m}^{-2}$  o menos) y se degrada bajo la luz intensa. Entre tanto, CRY2 afecta la elongación del pecíolo en *Arabidopsis* bajo luz azul intensa (Wang *et al.*, 2018).

Las *fototropinas* son fotorreceptores de luz azul y luz UV-A que controlan el fototropismo (Kong y Okajima, 2016). La apoproteína presenta dos cromóforos (flavinas) y un dominio de la kinasa. Cada fototropina contiene dos proteínas LOV (luz, oxígeno y voltaje), dos cromóforos y una región kinasa. Las proteínas relacionadas con las fototropinas están presentes en diferentes organismos y regulan respuestas a estímulos ambientales, como luz y oxígeno. Las fototropinas PHOT1 y PHOT2 pueden regular el crecimiento fototrópico en los espacios abiertos del canopi, controlan el fototropismo y la fotomorfogénesis, movimientos de cloroplastos, apertura de estomas por la luz azul, y son moduladas por los criptocromos y los fitocromos (Lin *et al.*, 2019). La mayoría de las fototropinas se encuentran en las células meristemáticas de plántulas etioladas.

UVR8, UV RESISTANCE LOCUS 8, es el único fotorreceptor UV-B identificado hasta la fecha y utiliza un homodímero simétrico compuesto por homodímeros proteicos con triptófano como cromóforo activado por la radiación UV-B (Tilbrook *et al.*, 2013; Huché-Théliér *et al.*, 2016).

*Zeitlupe* (ZTL), *Kelch unido a Flavina* (FKF1) y *LOV Kelch* (LKP2/FKL1). Estas proteínas (ZTL/FKF 1/LKP2) forman una familia de fotorreceptores de luz UV-A y luz azul que tienen a mononucleótidos de flavina (FMN) como cromóforos, al igual que las fototropinas. Están compuestas por tres dominios: un LOV, una caja F en el lado N-terminal y un dominio Kelch en el extremo C-terminal (Huché-Théliér *et al.*, 2016).

Teniendo en cuenta UVR8 como un fotorreceptor de luz UV-B caracterizado recientemente y la información disponible para *Arabidopsis*, en la percepción del espectro entre luz UV y rojo lejano, las plantas hacen uso de por lo menos trece fotorreceptores, que incluyen cinco fitocromos (PHYA-E), dos fototropinas (PHOT1 y PHOT2), dos criptocromos (CRY1 y CRY2) y tres miembros de la familia Zeitlupe (ZTL, FKF1 y LKP2) (Tilbrook *et al.*, 2013).



### 8.1.5 Control de la intensidad y tipo de luz

Balode (2016) comparó el efecto de iluminación LED (diodos emisores de luz) con la iluminación natural sobre el desarrollo y el tiempo de floración en dos cultivares de lirio de diferentes grupos: lirio asiático cv. London Heart y lirio LO (*Lilium longiflorum* × Oriental hybrid) cv. Triumphator. La luz LED se suministró durante 8 h por día (08:00-12:00 y 15:00-19:00) para recrear un fotoperiodo de días largos (> 14 h). El tiempo promedio de floración bajo LED del cv. London Heart fue de 58 días después de siembra (DDS) y para el cv. Triumphator, de 61, en comparación con la luz natural de 63 y 67 DDS, respectivamente. De ahí que el autor sugiere que la iluminación LED puede ser usada con éxito para proveer el fotoperiodo de días largos que promueve la floración en los cultivares de lirio ensayados. El estudio también demostró que con el uso de LED azules y rojos se aumentaron significativamente la altura de la planta, el número de flores en el tallo y la longitud de hojas en el lirio asiático; en el lirio LO se incrementó la altura de la planta y la longitud y el ancho de la hoja, en comparación con el tratamiento de luz natural. Para Xiao-li *et al.* (2014), las fuentes de luz mixtas de lámparas fluorescentes y LED rojo o azul fueron beneficiosas en lechuga cv. Green Oak Leaf.

Schroeter-Zakrzewska *et al.* (2017) compararon la influencia de las lámparas LED y fluorescente con el color de la luz: rojo (R), azul + blanco (B + W), rojo + azul (R + B); verde (G); blanco (W), azul (B), sobre la calidad y el estado nutricional del crisantemo (*Chrysanthemum x grandiflorum* Ramat./Kitam.). Observaron una floración más temprana en las plantas bajo lámparas LED que emitían luz W y luz B, y las cabezas florales más grandes las produjeron las plantas cultivadas bajo luz B y R+B. La luz R emitida por ambos tipos de lámparas tuvo un efecto adverso sobre la floración de las plantas. Tanto el tipo de lámparas como el color de la luz emitida modificaron significativamente el estatus nutricional de la planta. El contenido medio de N, P, Ca, Mg y S fue mayor en las plantas cultivadas bajo LED que con las lámparas FL, con una tendencia similar para el contenido de microelementos.

## 8.2 Mallas fotoselectivas

El uso de mallas de sombrío es una de las tecnologías usadas en la actualidad. Se considera que disminuye la intensidad de radiación y evita incrementos de temperatura durante periodos cálidos. Si bien la malla de color negro es la más utilizada por su bajo costo, se han desarrollado nuevas mallas fotoselectivas que modifican las propiedades de la luz en razón a que incrementan la transmitancia de regiones espectrales del azul, rojo, rojo lejano y la radiación difusa, aumentando principalmente en el espectro visible correspondiente al color de la malla (Shahak, 2008).

Las cubiertas fotoselectivas proveen protección a los cultivos y la capacidad para manipular el crecimiento vegetal (Shahak *et al.*, 2004). Incrementan o reducen longitudes de onda específicas mientras mantienen sin alterar la relación R:RL (Cummings *et al.*, 2008), si bien el mecanismo de acción de estas mallas aún no está claro. Su principal efecto está asociado a cambios en la morfología de las plantas por la activación de una sofisticada red de fotorreceptores (Aleric y Kirkman, 2005).

Madrigal (2011), con la implementación de mallas fotoselectivas rojas y azules en plantas de pimentón, obtuvo un incremento en la longitud entre 23,1 y 33 %, aumentos en área foliar del 86 % y en la calidad del fruto en un 52 %. Ayala-Tafoya *et al.* (2015) encontraron que el uso de mallas rojas y perlas ocasionó un alargamiento en tallos de pepino, junto con un incremento en área foliar, número de hojas y masas secas y frescas de todos los órganos vegetativos, mejorando el rendimiento cerca de un 71 % con mallas perla, y un 48,1 % con mallas rojas. Rodríguez y Minerva (2015) también reportan aumento de rendimiento en cultivos de arándanos, junto con un incremento en el diámetro ecuatorial de las flores y frutos.

Con el uso de mallas fotoselectivas se podría propender por un uso más eficiente de la energía solar, control de algunas plagas y enfermedades, reducción en la aplicación de productos para el control fitosanitario, y reducción de riesgos ambientales. También se podría considerar en la mejora

271



Las nuevas mallas fotoselectivas modifican las propiedades de la luz al incrementar la transmitancia principalmente en el espectro visible correspondiente al color de la malla.



y definición de algunos rasgos y características fisiológicas deseables para la comercialización de plantas. Se trata de una tecnología de amplio uso en distintos climas y especies vegetales, de fácil uso y económica en condiciones de clima estacional. En Colombia, la investigación sobre el uso de mallas fotoselectivas es incipiente, y una propuesta para avanzar en esta tecnología debe tener presente la naturaleza de la información que se deriva del ambiente de la luz natural, así como la fotomorfogénesis mediada por fotorreceptores.

## 8.3 Aspectos teóricos básicos y potencial aplicación de las huellas espectrales en floricultura

### 8.3.1 Fundamentos de las huellas espectrales



Para avanzar en el uso de mallas fotoselectivas se debe tener presente la naturaleza de la información que se deriva del ambiente de la luz natural, así como la fotomorfogénesis mediada por fotorreceptores.

El sol u otra fuente emiten energía que se conoce como radiancia; la energía que incide por unidad de área y tiempo sobre el objeto se llama irradiancia, mientras que la energía que emite el objeto y que es captada se conoce como radiancia espectral (Hueni, 2006). Cuando la luz incide sobre la superficie de la hoja, parte de la luz se refleja hacia la fuente de origen. La cantidad de energía reflejada en cada frecuencia de luz se denomina espectro de reflectancia, a veces abreviado por espectros o por reflectancia (Martínez-Martínez *et al.*, 2018). Las huellas espectrales se fundamentan en las propiedades de la luz y su interacción con los objetos, que para el caso de las aplicaciones en agricultura serán las partes de las plantas de importancia económica como hojas, flores, frutos, tallos, raíces, entre otros, las cuales puedan captar la luz y emitir una respuesta medida como una reflectancia.

Las huellas espectrales se relacionan con el espectro electromagnético, en especial con la región visible y el infrarrojo, las cuales se denominan regiones informativas (figura 8.1). En el espectro visible (400 y 700 nm) la reflectancia depende

principalmente de la presencia de pigmentos fotosintéticos como la clorofila. Para el caso del dominio infrarrojo cercano (700-1300 nm), donde no hay características de absorción fuertes, la magnitud de la reflectancia se rige por las discontinuidades estructurales encontradas en la hoja. Por su parte, la región infrarroja de onda corta (1300-3000 nm) presenta valores de reflectancia variables, principalmente vinculados a las características de absorción de agua y otros compuestos (Peñuelas y Filella, 1998).

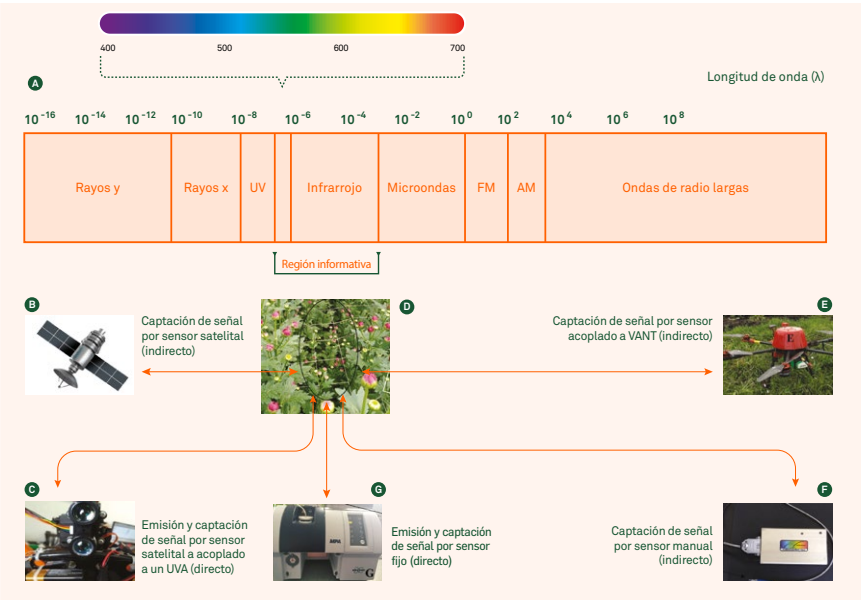
La reflectancia depende de las propiedades de la superficie de la hoja, de su estructura interna, así como de la concentración y distribución de componentes bioquímicos (Martínez-Martínez *et al.*, 2018). La espectroscopia se considera una técnica altamente sensible en el reconocimiento de parámetros específicos de un producto. Su fundamento se basa en la detección de complejas interacciones químicas y físicas del comportamiento molecular del C-H, O-H y N-H (Nicolai *et al.*, 2007).

La forma como se puede captar la información espectral de un objeto puede variar; existen sensores que solo captan la señal (pasivos) y otros que la emiten y la captan (sensores activos). Así que existen múltiples formas de captar y emitir estas señales, para lo cual hay diferentes disposiciones (véase la figura 8.1).

La reflectancia obtenida de las plantas se puede captar por medio de satélites, imágenes tomadas por cámaras espectrales digitales, espectrorradiómetros u otros equipos similares, los cuales pueden ser fijos, operados manualmente o acoplados a un vehículo aéreo no tripulado (VANT) (Gitelson *et al.*, 2002). Los equipos utilizados más conocidos son los fotómetros y los radiómetros multibandas. Las regiones analizadas empiezan en el azul (400 nm), pasan por el infrarrojo cercano (780-2500 nm) y por el infrarrojo medio (2,5-25  $\mu\text{m}$ ) (Hueni, 2006). En estos dispositivos podemos tener distintas variaciones: (i) espectrorradiómetros de laboratorio, que son equipos fijos; (ii) espectrorradiómetros de campo, equipos manuales que pueden ser usados en condiciones de campo; (iii) espectrorradiómetros de imagen en el aire, los cuales pueden ser manuales o ser acoplados a VANT, y (iv)

espectrorradiómetros de imágenes espaciales, donde existe gran cantidad de satélites con variadas formas de imágenes satelitales, las cuales pueden ser multibandas o hiperbandas (Hueni, 2006) (figura 8.1). Además, pueden poseer diversas resoluciones espectrales (número de bandas) y espaciales (resolución del pixel). Estas pueden ser productos libres o de costo variable.

➔ **Figura 8.1** Aspectos fundamentales de los principios básicos de las huellas espectrales aplicados en la agricultura. **A.** Región del espectro informativa para un análisis espectral; **B.** Sensor indirecto de tipo satelital para la captación de señales de reflectancia; **C.** Sensor directo con capacidad para emitir y captar señales espectrales (LIDAR-Lite v3-Laser Ranging Module); **D.** Problema por estudiar (plantas de crisantemo con retraso en el crecimiento); **E.** Vehículo aéreo no tripulado o dron como soporte y obtención de señales mediante sensores espectrales; **F.** Espectrorradiómetro manual (EPP 2000 StellarNet Inc) para la emisión y adquisición de señales espectrales, y **G.** Espectrorradiómetro fijo (MPA Bruker G) para la emisión y adquisición de señales espectrales.



FUENTE: elaboración J.G. Ramírez-Gil.

### 8.3.2 Herramientas básicas para el análisis de huellas espectrales

El uso de la información generada por medio de los métodos y equipos en la obtención de bandas espectrales y multiespectrales requieren un proceso riguroso de obtención,

limpieza y procesamientos de los datos. Además, exige una calibración y validación previa a su uso práctico en condiciones de campo. Esto implica una secuencia de trabajo que puede resumirse de la siguiente manera: (i) muestreo estadístico, (ii) adquisición de espectros, (iii) organización de datos brutos de espectros, (iv) preprocesamiento, (v) reducción de la dimensionalidad, (vi) calibración de un modelo, (vii) validación del modelo, (viii) selección de bandas o índices de vegetación informativos, y (ix) modificación o diseño de equipos para la toma de datos en las bandas informativas del espectro (Griffith y Anderson, 2019).

Cuando se trabaja con respuestas espectrales en función del número de bandas (imágenes espectrales, multiespectrales e hiperespectrales) se utilizan tres enfoques principales: (i) análisis espectral mixto; (ii) redes neuronales, y (iii) índices de vegetación; sin embargo, en la actualidad se está haciendo uso de herramientas más avanzadas con algoritmos de aprendizaje automático como el perceptrón multicapa, las redes neuronales convolucionales de aprendizaje profundo, regresión de vectores de soporte y bosques aleatorios (Lehnert *et al.*, 2019). Los algoritmos de aprendizaje automático se entrenan utilizando conjuntos de datos extraídos de datos multiespectrales capturados a nivel del dosel con un vehículo aéreo no tripulado o equipos manuales.

Cuando se usan productos tomados en campo de sensores atmosféricos y obtenidos de satélites hay que realizar un buen preprocesamiento de la información, en especial lo referente a las correcciones atmosféricas. Estos tipos de productos presentan una alta variación y fuentes de error debido a la influencia del entorno de muestreo (por ejemplo, velocidad y dirección del viento, cobertura y tipo de nubes, temperatura, humedad, aerosoles, entre otros), geometría de visualización (grado óptico delantero, campo de visión, campo de visión instantáneo, altura óptica anterior sobre el objetivo y suelo), o geometría de iluminación (fecha, hora, posición y altitud del sol, acimut y orientación, humo y neblina) (Awad *et al.*, 2019). Por otra parte, cuando se utilizan VANT, se debe haber calibrado previamente la altura de vuelo óptima para lograr optimizar la toma de datos. Es importante



tener en cuenta que cuando se usa este tipo de estrategia se recomienda el uso de un *software* de análisis de imágenes que permita la corrección radiométrica usando el sensor y el panel de calibración de la cámara junto con la corrección geométrica basada en el uso de puntos de control terrestre GCP (por sus siglas en inglés), con coordenadas GPS (sistema de posicionamiento global, por traducción del inglés). Después de este proceso, se procede a determinar distintos índices de vegetación (NDVI, GNDVI, EVI, SAVI, entre otros) (Rumpf *et al.*, 2010; Sankaran *et al.*, 2010; Mahlein *et al.*, 2013) mediante la combinación de bandas, y a relacionarlos con el fenómeno en estudio.

Los datos captados mediante espectrorradiómetros fijos tienen múltiples ventajas sobre los sensores aéreos operados en condiciones de campo y espaciales, en razón a que se reducen los errores atmosféricos, además de tener la capacidad de obtener más bandas informativas y una mejor resolución temporal (Awad *et al.*, 2019). Los productos obtenidos con dichos espectrorradiómetros no están libres de errores, por lo que se les debe realizar un preprocesamiento, que consiste en la reducción del ruido con el fin de eliminar las bandas no informativas, de baja señal o confusas, para lo cual se emplean las técnicas denominadas *smoothing* y *scattering*. El suavizado espectral tiene como objetivo reducir el ruido de alta frecuencia (por ejemplo, eliminar los “picos” en el espectro). Sin embargo, al suavizar un espectro se debe prestar atención a no eliminar componentes de alta frecuencia que representen información útil (Savitzky y Golay, 1964; De Maesschalck *et al.*, 1999; Rinnan *et al.*, 2009; Huang *et al.*, 2010; Sandak *et al.*, 2016; Griffith y Anderson, 2019). Los métodos más comunes utilizados para suavizar las huellas espectrales obtenidas son: (i) la ventana de promedio móvil, (ii) el algoritmo Savitzky-Golay, (iii) el filtro de Loess, y (iv) el filtro medio y el filtro Spline (Lehnert *et al.*, 2019; Griffith y Anderson, 2019).

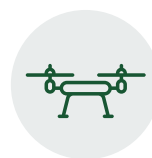
Por otra parte, los espectros a menudo exhiben una compensación de línea de base y una tendencia curvilínea causada por cambios en el ángulo de iluminación o la longitud del camino óptico. Los métodos de corrección de referencia son

generalmente simples, y a menudo conservan la forma espectral principal. La derivada se puede ver como una forma especial de método de corrección de línea de base ya que elimina las señales de fondo constantes (Savitzky y Golay, 1964; De Maesschalck *et al.*, 1999; Rinnan *et al.*, 2009; Huang *et al.*, 2010; Sandak *et al.*, 2016; Griffith y Anderson, 2019).

Posteriormente, y cuando se ha realizado un pretratamiento de los datos, se utilizan herramientas discriminantes como las siguientes: análisis de discriminación logística, análisis de regresión logística (para cada longitud de onda), análisis discriminante logístico de mínimos cuadrados parciales, análisis discriminante lineal, k vecinos más cercanos, modelado independiente suave de analogía de clases, mínimos cuadrados parciales discriminantes, análisis discriminante de pro-chuster, árbol de clasificación y regresión, red neuronal probabilística y red neuronal basada en la cuantificación del vector de aprendizaje (Rumpf *et al.*, 2010; Sankaran *et al.*, 2010; Mahlein *et al.*, 2013). A continuación, se seleccionan los modelos que presenten menor complejidad y mayor capacidad de predicción con base en criterios de selección estadísticos. Adicionalmente, con el fin de hacer una clasificación de las respuestas, se puede utilizar el algoritmo RELIEF-F (Robnik-Šikonja y Kononenko, 2003; Mahlein *et al.*, 2013), o algoritmos como Random Forest, del cual después de realizar un entrenamiento se pueden derivar parámetros estadísticos de evaluación como matrices de confusión y áreas bajo la curva (AUC, por sus siglas en inglés) que verifiquen la capacidad del clasificador.

### 8.3.3 Aplicaciones potenciales de las huellas espectrales en la agricultura

En la actualidad, en el sector agropecuario existe una tendencia denominada *Smart farming*, cuyo objetivo es la gestión de la información para una correcta toma de decisiones (Kamilaris *et al.*, 2017; Karmas *et al.*, 2016; Lokers *et al.*, 2016; Tyagi, 2016). Esta tecnología se apoya en la agricultura de precisión, sensores remotos, la robótica, la nube, la



277

El uso adecuado y potencial de la tecnología espectral en condiciones de campo requiere de un proceso inicial de calibración y validación, que implica organización de datos de espectros de reflectancia, preprocesamiento, reducción de dimensionalidad y análisis discriminante.





Después del  
proceso de  
calibración y  
validación las  
huellas espectrales  
pueden convertirse  
en herramientas  
tecnológicas  
fáciles de usar. Se  
pueden integrar  
a los programas  
de gestión de  
la información,  
dando lugar a una  
mejor toma de  
decisiones.

computación, el internet de las cosas, el análisis de *big data*, la inteligencia artificial, el *machine learning*, los sistemas de información y comunicación, entre otros, con múltiples beneficios económicos e indicadores ambientales (Chen *et al.*, 2018; Kamilaris *et al.*, 2017; Karmas *et al.*, 2016; Weber y Weber, 2010).

La detección de una respuesta específica en una planta por sensores incluye el uso de termografía, imágenes de fluorescencia, índices de vegetación, técnicas hiperespectrales, entre otras (Mahlein *et al.*, 2012; Mahlein *et al.*, 2017; Fang y Ramasamy, 2015). Con el uso de estos sensores se pueden obtener dos tipos de datos; por una parte, se generan imágenes con información en cada pixel asociada a índices de vegetación, índices de enfermedad y mapas de calor en falso color o bandas espectrales asociadas a reflectancias que se pueden relacionar con la presencia y cuantificación de una determinada patología, factor de estrés, nivel nutricional, o cualquier otra característica que se desee evaluar (Lowe *et al.*, 2017). La espectroscopia es una técnica prometedora debido a sus enormes ventajas, dentro de las cuales se destacan la rapidez, la medición no invasiva, la facilidad de uso y la preparación mínima de la muestra (Qu *et al.*, 2015).

Hoy en día, se destacan ejemplos exitosos de la integración de las tecnologías de la información, los conceptos de agricultura inteligente, el uso de sensores para la cuantificación y determinación de variables de forma indirecta; sobresalen especialmente aquellos asociados al manejo de plagas, enfermedades, determinación indirecta de concentraciones nutricionales, proceso fisiológicos, características específicas de una especie de planta, entre otras (Figuerola y Pope, 2017; Yamamoto *et al.*, 2017). Para el caso de la floricultura se reporta el uso herramientas espectrales para la clasificación automática en poscosecha de flores de calla (*Zantedeschia aethiopica* [L.] Spreng.) (Steidle *et al.*, 2009).

Las herramientas mencionadas permiten establecer áreas homogéneas de terreno y caracterizar el estado fisiológico o fitosanitario del cultivo, entre otros, posibilitando un manejo por sitio específico acorde con las necesidades espaciales y temporales (Bongiovanni y Lowenberg-Deboer,

2004). Estas tecnologías han facilitado el desarrollo de herramientas tecnológicas que se integran a programas de manejo por sitio, dando lugar a una gestión y a una toma de decisiones óptimas, mejorando la sostenibilidad y rentabilidad de los sistemas de producción (Ramírez-Gil *et al.*, 2018).

En este sentido, las huellas espectrales se convierten en una tecnología emergente con un alto potencial para el uso en el sector floricultor, la cual puede presentar alternativas a métodos tradicionales asociados a la detección y monitoreo de patologías e insectos, fuentes de estrés por factores abióticos (excesos o déficit hídrico, altas temperaturas, alta radiación, suelos salinos, entre otros), determinación de estados nutricionales de las plantas, respuestas fisiológicas, cuantificación de rendimientos, medición de la calidad de flores y follajes, estimación indirecta de vida en poscosecha, por citar solo algunas.

## 8.4 Aplicación práctica de las mallas fotoselectivas en un cultivo de rosas

279


### 8.4.1 Materiales y métodos

#### 8.4.1.1 Localización, material vegetal y tratamientos utilizados

El ensayo se desarrolló en condiciones de invernadero en las instalaciones de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Agrosavia (antes Corpoica), centro Tibaitatá. Para esta investigación se utilizaron miniplantas de rosa cv. Freedom injertadas sobre Natal Brier, adquiridas a la empresa Rosen Tantau, y sembradas a una densidad de 8,9 plantas m<sup>2</sup>/invernadero en un sustrato orgánico compuesto de 70 % cascarilla de arroz tostada + 15 % cascarilla de arroz tostada reutilizada + 15 % compost, suministrado por la compañía Florval SAS, empresa perteneciente a GR Chía. Se establecieron cinco tratamientos con mallas tejidas de fibras de polietileno de colores rojo y perla, ambas con 30 y 40 % de intensidad de sombrío, como se muestra en la tabla 8.2. Las



mallas se ubicaron a 1,5 m por encima del dosel del cultivo, 17 semanas después de siembra (SDS). La evaluación se realizó en un ciclo de producción comprendido entre *pinch* y pico de producción. El manejo agronómico del cultivo se desarrolló teniendo como referencia las prácticas de los cultivos comerciales, y básicamente siguiendo lo descrito en Flórez *et al.* (2006).

 **Tabla 8.2** Tratamientos de mallas fotoselectivas de colores evaluadas en planta de rosa cv. Freedom.

TRATAMIENTO	COLOR DE MALLA	PORCENTAJE DE SOMBRÍO
R30	Rojo	30
R40		40
P30	Perla	30
P40		40
T	Testigo	0

R30 y R40 = mallas de color rojo con 30 y 40 % de sombrío, respectivamente; P30 y P40 = mallas de color perla con 30 y 40 % de sombrío, respectivamente; T = tratamiento testigo, sin malla.

**8.4.1.2 Variables analizadas y diseño estadístico**

Para el análisis de crecimiento destructivo se obtuvieron muestras a las 0, 4, 8 y 11 semanas después del *pinch* (SDP), cuantificándose el área foliar y la masa seca de la raíz y de la parte aérea (discriminada en masa seca de tallos y hojas). En las 5, 6, 7, 8, 10 y 11 SDP se determinaron las variables de crecimiento continuo, como longitud del tallo, diámetro del tallo, número de hojas, longitud y diámetro del botón floral y número de tallos por planta. La evaluación de productividad y calidad se hizo durante tres semanas, a partir de la 11 SDP, para lo cual se cuantificó el número de tallos florales producidos por tratamiento por m<sup>2</sup>, para luego clasificarlos en función de los siguientes grados de calidad: nacional, 40s, 50s, 60s, 70s, 80s y 90s.

Se utilizó un diseño completamente aleatorizado con cinco tratamientos y tres repeticiones. Como unidad experimental, se consideró la cama de cultivo y cada planta como unidad observacional. Para las variables continuas se realizó análisis de varianza, y para las que no cumplieron con los supuestos de normalidad y homocedasticidad de varianza se

realizó análisis no paramétrico. En las variables que cumplieron los supuestos se utilizó el test de Duncan, y en las variables que no cumplieron se aplicaron comparaciones múltiples por Kruskal Wallis. Los análisis se realizaron con el *software* estadístico SAS 9.1, con un valor de significancia del 0,05.

### 8.4.2 Resultados relevantes

Respecto a la variable número de tallos por planta (tabla 8.3) se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas, por lo que en la 8 SDP el tratamiento P40 (3,8) mostró un valor mayor a los tratamientos P30 (3,1) y R40 (2,8), mientras que los tratamientos T (3,6), R30 (3,2) y P30 (3,1) mostraron valores intermedios, diferencia que se mantuvo hasta la cosecha (11 SDP), en razón a que después de la 8 SDP el número de tallos se estabiliza. Para la variable longitud del tallo floral (tabla 8.3) se evidenció una tendencia de mayores valores en el tratamiento R30, la cual se torna estadísticamente significativa en la 11 SDP, cuando el tratamiento R30 mostró un valor (106,5 cm) mayor con respecto al tratamiento testigo (97,2 cm), mientras que los demás tratamientos presentaron valores intermedios. En relación con el diámetro del tallo floral (tabla 8.3), en la cosecha los tratamientos P30 (7,3 mm) y R30 (7,2 mm) señalaron valores estadísticamente significativos, con promedios mayores a los demás tratamientos, incrementando 8,9 % y 8,4 % en comparación con el testigo (6,7 mm), respectivamente. Ahora bien, para la variable número de hojas (tabla 8.3) se observó diferencia estadística significativa hacia la 7 SDP, cuando el tratamiento R30 (12,4) fue mayor a P40 (10,7), con los demás tratamientos —P30 (10,9), R40 (11,1) y T (11,2)— mostrando un comportamiento intermedio.

Con las diferencias estadísticamente significativas que se muestran es posible afirmar que el mejor tratamiento con relación al testigo es la malla roja al 30 % de sombrío, en razón a que mantuvo el número de tallos por planta incrementando su longitud, diámetro y número de hojas del tallo floral; por el contrario, la malla roja al 40 % de sombrío redujo de manera



considerable el número de tallos, su diámetro y número de hojas. Este resultado concuerda con lo reportado por Hlats-hway y Wahome (2010), quienes, en clavel, establecieron que porcentajes por encima del 40 % de sombra inhiben sig-nificativamente la estimulación de nuevos brotes o tallos; sin embargo, indican que porcentajes bajos de sombrío, alrede-dor de 20 %, aumentan la brotación debido a que se mejoran las condiciones de luz, temperatura y humedad relativa. Asi-mismo, Ayala *et al.* (2018) encontraron que la malla roja al 30 % de sombrío transmitió 40 % más densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD) y aumentó significativamente la luz roja (600-700 nm) en comparación con la malla negra, lo que se tradujo en mayor tasa de fotosíntesis y conductan-cia estomática durante el día en comparación con las plantas control (sin malla). Estos niveles de luz favorecieron la foto-síntesis; por ende, se aumentó la producción de biomasa, que generalmente implica un área mayor del floema y, en conse-cuencia, un eficiente transporte, y a su vez mayor capacidad

➔ **Tabla 8.3** Efecto de mallas fotoselectivas de colores rojo y perla con porcentajes de 30 y 40 % de sombrío sobre variables de crecimiento en tallos florales de plantas de rosa cv. Freedom cultivadas en sustrato.

VARIABLE/ TRATAMIENTO	SDP	P30	P40	R30	R40	T
Número de tallos	11	3,1 <sup>z</sup> bc	3,8 a	3,2 abc	2,8 c	3,6 ab
Longitud de tallo (cm)	11	102,1 ab	102,9 ab	106,6 a	105,3 ab	97,2 b
Diámetro de tallo (mm)	11	7,3 a	6,8 b	7,2 a	6,8 b	6,7 b
Número de hojas	5	6,7 b	6,7 b	8,4 a	7,2 ab	6,8 b
	7	10,9 ab	10,7 b	12,4 a	11,1 ab	11,2 ab
	11	13,0 a	13,2 a	14,0 a	12,9 a	13,3 a
Diámetro del botón floral (mm)	8	9,4 b	8,7 b	11,4 ab	8,6 b	13,8 a
	11	35,8 a	31,5 a	37,0 a	34,7 a	38,1 a

R30 y R40 = mallas de color rojo con 30 y 40 % de sombrío, respectivamente; P30 y P40 = mallas de color perla con 30 y 40 % de sombrío, respectivamente; T = tratamiento testigo, sin malla.  
SDP = Semanas después del *pinch*.  
<sup>z</sup>Promedios seguidos por la misma letra en cada fila no presentan diferencia estadísticamente significativa por la prueba de Duncan a un  $P \leq 0,05$ .  
**FUENTE:** Páez (2018).

de reserva de fotoasimilados. Además, Ilic *et al.* (2015) reportaron que, al modificar el ambiente espectral, se aumenta la luz difusa, lo que permite realizar fotosíntesis de una forma más eficiente debido a su mayor capacidad para penetrar en el dosel de las plantas.

La producción de masa seca foliar y de raíz no presentó diferencias estadísticas significativas en los tratamientos evaluados (datos no mostrados), aunque la variable masa seca de tallos en la 11 SDP (figura 8.2) sí señaló a los tratamientos R30 (64,2 g), P30 (63,6 g) y P40 (63,2 g) como estadísticamente significativos; es decir, hubo evidencia de un contenido de masa seca superior a los tratamientos R40 (54,5 g) y T (55,7 g). En cuanto al área foliar, en la 8 SDP los tratamientos R30 (4609,4 cm<sup>2</sup>) y P40 (4540,1 cm<sup>2</sup>) presentaron valores estadísticamente significativos, mostrando áreas foliares mayores que en el tratamiento R40 (3833,4 cm<sup>2</sup>), mientras que en la 11 SDP los tratamientos R30 (4672,6 cm<sup>2</sup>), P40 (4617,5 cm<sup>2</sup>) y P30 (4578,8 cm<sup>2</sup>) fueron estadísticamente significativos, con áreas foliares notablemente mayores al tratamiento testigo (3675,9 cm<sup>2</sup>), con el tratamiento R40 (4370 cm<sup>2</sup>) con valor intermedio de área foliar, como se observa en la figura 8.2. El aumento del área foliar de los tratamientos sombreados en comparación con el testigo se puede atribuir a la expansión individual de las hojas influenciada por una menor relación de luz roja:azul (Costa *et al.*, 2010).

En lo relativo a la productividad, no se presentaron diferencias estadísticas significativas en el número de tallos florales por m<sup>2</sup>, mientras que, en calidad, a excepción de los grados de calidad 40s y 90s, se encontraron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos respecto a los porcentajes de tallos florales en los demás grados de calidad (figura 8.3). El tratamiento R40 presentó un mayor número de tallos florales en los grados de calidad nacional y 50s. En el grado 60s, los tratamientos P30 y T obtuvieron valores mayores, mientras que en los grados 70s y 80s los tratamientos P40 y R30 mostraron el mayor número de tallos florales. Los resultados concuerdan con Ayala-Tafoya *et al.* (2011), quienes reportaron que en la malla perla se alcanzaron los 30 valores más altos en rendimiento total comercial con calidad



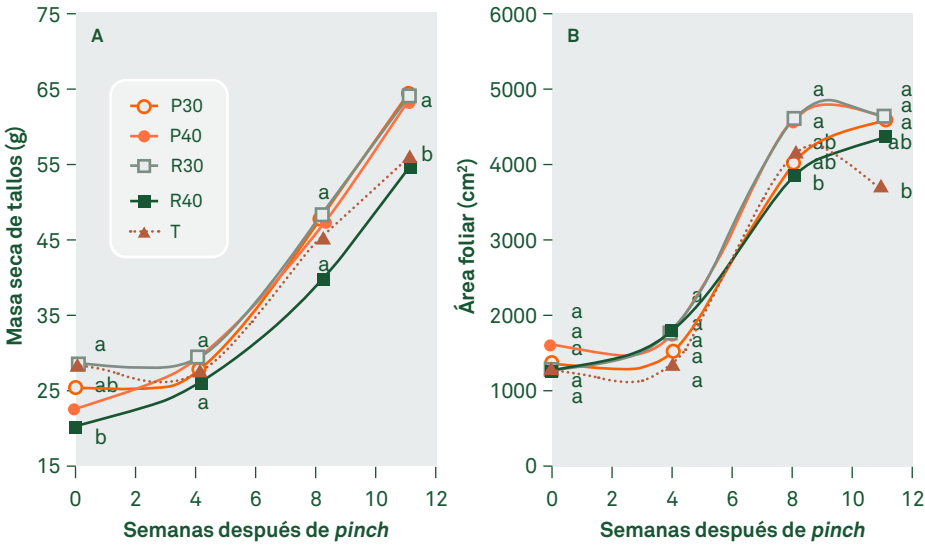
**La malla roja al 30 % de sombrió es el mejor tratamiento con relación al testigo en razón a que mantuvo el número de tallos por planta incrementando longitud, diámetro y número de hojas del tallo floral.**





de exportación, mientras que, bajo la malla azul al 50 % se cosechó más tomate para mercado nacional. Asimismo, se reportó en *Lisianthus* y dos cultivares de girasol un aumento significativo de la longitud y peso de los tallos florales bajo la malla amarilla y roja, en comparación a la malla negra y azul independiente de la variedad que se utilice, características determinantes en la selección y clasificación de las flores de corte como la rosa (Ovadia *et al.*, 2009).

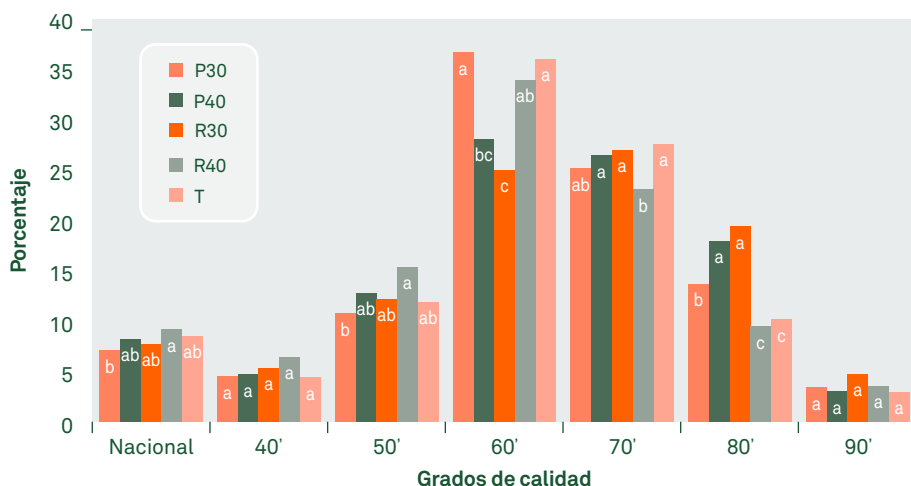
**Figura 8.2** Comportamiento de las variables masa seca (A) y área foliar (B) de tallos florales de plantas de rosa cv. Freedom sometidas al efecto de mallas fotoselectivas. R30 y R40 = mallas de color rojo con 30 y 40 % de sombrío, respectivamente; P30 y P40 = mallas de color perla con 30 y 40 % de sombrío, respectivamente; T = tratamiento testigo, sin malla. Promedios seguidos por la misma letra no presentan diferencias estadísticas significativas por la prueba de Duncan a un  $P \leq 0,05$ .



8.4.3 Conclusiones

Con la malla roja al 30 % de sombrío (R30) se obtuvieron el mejor diámetro, longitud y masa seca de tallos florales, sin afectar el número de tallos por plantas o el tamaño del botón floral, lo cual se reflejó en la variable grados de calidad, con diferencia estadísticamente significativa en los grados 70s y 80s. La malla de color perla al 40 % de sombrío mostró mayor ramificación de la planta de rosa después del *pinch*, con

➔ **Figura 8.3** Porcentajes de grados de calidad para los tallos florales de plantas de rosa cv Freedom sometidas al efecto de mallas fotoselectivas. R30 y R40 = mallas de color rojo con 30 y 40 % de sombrío, respectivamente; P30 y P40 = mallas de color perla con 30 y 40 % de sombrío, respectivamente; T = tratamiento testigo, sin malla. Promedios seguidos por la misma letra no presentan diferencias estadísticas significativas por la prueba de Duncan a un  $P \leq 0,05$ .



285

un número de tallos florales por planta notablemente mayor, mientras que con la malla 30 % de sombrío se mejoró el diámetro. Porcentajes de sombra por encima del 30 % reducen significativamente la radiación total disminuyendo la calidad de los tallos florales. Con el tratamiento R40 se redujo el número de tallos por planta, la producción de hojas y la calidad, con mayores porcentajes en los grados nacional y 50s.

## Agradecimientos

Los investigadores del Grupo de Horticultura de la Universidad Nacional de Colombia agradecen a la Asociación Colombiana de Exportadores de Flores (Asocolflores), al Centro de Innovación de la Floricultura Colombiana (Ceniflores), a la Universidad de La Salle, a la Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia) y, en especial, a la Gobernación de Cundinamarca,



por la posibilidad de participar en la ejecución del proyecto “Fortalecimiento de la competitividad del sector floricultor colombiano mediante el uso de ciencia, tecnología e innovación aplicadas en Cundinamarca”. De igual manera, los investigadores agradecen a la compañía Brenntag Colombia S.A. por el gentil suministro de las soluciones fertilizantes utilizadas en el ensayo.

## Conflictos de interés y contribuciones de autoría

El manuscrito fue preparado y revisado de manera conjunta por los autores, quienes declaran no tener ningún conflicto de interés que comprometa la validez de los resultados aquí presentados.

## Referencias

- Aleric, K. y L. Kirkman. 2005. Growth and photosynthetic responses of the federally endangered shrub, *Lindera melissifolia* (Lauraceae), to varied light environments. *Am. J. Bot.* 92(4):682-689. DOI: 10.3732/ajb.92.4.682.
- Asocolflores. 2018. Floricultura Colombiana. En: Cifras estadísticas, <http://www.asocolflores.net.co>. Consulta: abril de 2018.
- Awad, M. M., B. Alawar y R. Jbeil. 2019. A new crop spectral signatures database interactive tool (CSSIT). *Data.* 4(2):1-14. DOI: 10.3390/data4020077.
- Ayala T., F., M.G. Yáñez J., C.A. López O., R. Medina L., T. de J. Velásquez A. y T. Díaz V. 2018. Sunlight transmitted by colored shade nets on photosynthesis and yield of cucumber. *Cienc. Rural.* 48(9): e20170829. Disponible en: <http://www.scielo.br/pdf/cr/v48n9/1678-4596-cr-48-09-e20170829.pdf>; consulta: febrero de 2020. DOI: 10.1590/0103-8478cr20170829.
- Ayala-Tafoya, F., D.M. Zatarain-López, M. Valenzuela-López, L. Partida-Ruvalcaba, T. de J. Velázquez-Alcaraz, T. Díaz-Val-

- dés y J.A. Osuna-Sánchez. 2011. Crecimiento y rendimiento de tomate en respuesta a radiación solar transmitida por mallas sombra. *Terra Latinoam.* 29(4):403-410.
- Ayala-Tafoya, F., M. Yáñez-Juárez, L. Partida-Ruvalcaba, F. Ruiz-Espinosa, H. Campos-García, O. Vásquez-Martínez, J. Velázquez-Alcaraz y T. Díaz-Valdés. 2015. Producción de pepino en ambientes diferenciados por mallas de sombreo fotoselectivo. *ITEA*: 111(11):3-17. DOI: 10.12706/itea.2015.001.
- Balode, A. 2016. Use of LED lighting for lily (*Lilium* spp.) forcing. *Zinātniski praktiskā conference. "Līdzsvarota Lauksaimniecība"*, 25 a 26 de febrero de 2016. Latvia University of Agriculture, Jelgava, Latvia.
- Bernier, G y C. Périlleux. 2005. A physiological overview of the genetics of flowering time control. *Plant Biotechnol. J.* 3(1):3-16. DOI: 10.1111/j.1467-7652.2004.00114.x.
- Bernier, G., A. Havelange, C. Houssa, A. Petitjean y P. Lejeune. 1993. Physiological signals that induce flowering. *Plant Cell* 5:1147-55.
- Blackburn, G.A. 2007. Hyperspectral remote sensing of plant pigments. *J. Exp. Bot.* 58:855-867. DOI: 10.1093/jxb/erl123.
- Bongiovanni, R. y J. Lowenberg-Deboer. 2004. Precision agriculture and sustainability. *Precis. Agric.* 5(4):359-387. DOI: 10.1023/B:PRAG.0000040806.39604.aa.
- Bose, B., B. Pant, R.K. Singhal, M. Kumar y S. Mondal. 2018. Phytochrome: physiology, molecular aspects, and sustainable crop production. pp. 25-47. En: Abbas, Z., A.K. Tiwari y P. Kumar (eds.). *Emerging trends of plant physiology for sustainable crop production*. Waretown, NJ: Apple Academic Press. 394p.
- Chaerle, L., I. Leinonen, H.G. Jones y D. van Der Straeten. 2007. Monitoring and screening plant populations with combined thermal and chlorophyll fluorescence imaging. *J. Exp. Bot.* 58:773-784. DOI: 10.1093/jxb/erl257.
- Chaerle, L., S. Lenk, I. Leinonen, H.G. Jones, D.V.D. Straeten y C. Buschmann. 2009. Multi-sensor plant imaging: towards the development of a stress-catalogue. *Biotechnol. J.* 4:1152-1167. DOI: 10.1002/biot.200800242.



- Chailakhyan, M. KH. 1985. Hormonal regulation of reproductive development in higher plants. *Biol. Plant.* 27:292-302.
- Chen, X., J. Jia, W. Gao, Y. Ren y S. Tao. 2018. Selection of an index system for evaluating the application level of agricultural engineering technology. *Pattern Recogn. Lett.* 109:12-17. DOI: 10.1016/j.patrec.2017.09.028.
- Costa, L.C.B., J.E.B.F. Pinto, E.M. de Castro, E. Alves, S.K.V. Bertolucci y L.F. Rosal. 2010. Effects of coloured shade netting on the vegetative development and leaf structure of *Ocimum Selloi*. *Bragantia*. 69(2):349-359.
- Cummings, I.G., E. Foo, J.L. Weller, J.B. Reid y A. Koutoulis, 2008. Blue and red photoselective shadecloths modify pea height through altered blue irradiance perceived by the cry1 photoreceptor. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 83(5):663-667. DOI: 10.1080/14620316.2008.11512440.
- DANE. 2017. Exportaciones. En: [www.dane.gov.co](http://www.dane.gov.co). Consulta: abril de 2018.
- De Maesschalck, R., F. Estienne, J. Verdú-andrés, A. Candolfi, V. Centner, F. Despagne, D. Jouan-Rimbaud, B. Walczak y D.L. Massart. 1999. The development of calibration models for spectroscopic data using principal component regression. *Internet J. Chem.* 2:0-19.
- Etchevers, L. 2016. Influencia del ambiente lumínico en las defensas de las plantas. Laboratorio de Biotecnología Vegetal, Instituto de Agrobiotecnología del Litoral IAL.UNLCONICET. XX Encuentro de jóvenes investigadores de la Universidad Nacional del Litoral. 4p. Disponible en: <http://web10.unl.edu.ar:8080/tesis/bitstream/handle/11185/1561/2.3.7.pdf>; consulta: febrero de 2020.
- Fang, Y. y R.P. Ramasamy. 2015. Current and prospective methods for plant disease detection. *Biosensors*. 5(3):537-561. DOI: 10.3390/bios5030537.
- Figueroa, M. y C. Pope. 2017. Root system water consumption pattern identification on time series data. *Sensors*. 17(6):1410. DOI: 10.3390/s17061410.
- Flórez R., V.J., R. Parra R., M. Rodríguez S. y D.E. Nieto C. 2006. Características y fundamentos del proyecto “Producción más limpia de rosa y clavel con dos técnicas de

- cultivo sin suelo en la Sabana de Bogotá”. pp. 3-40. En: Flórez R., V.J., A. de la C. Fernández, D. Miranda L., B. Chaves C., J.M. Guzmán P. (eds.). Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana. Bogotá: Unibiblos. 500p.
- Franklin, K.A. 2016. Photomorphogenesis: plants feel blue in the shade. *Curr. Biol.* 26(24):1275-1276. DOI: 10.1016/j.cub.2016.10.039.
- Garner, W.W. y H.A. Allard. 1923. Further studies in photoperiodism, the response of plants to relative length of day and night. *J. Agric. Res.* 23:871-920.
- Gitelson, A. A., R. Stark, U. Grits, D. Rundquist, Y. Kaufman y D. Derry. 2002. Vegetation and soil lines in visible spectral space: A concept and technique for remote estimation of vegetation fraction. *Int. J. Remote Sens.* 23(13):2537-2562. DOI: 10.1080/01431160110107806.
- Griffith, D. M. y T. M. Anderson. 2019. The ‘plantspec’ R package: A tool for spectral analysis of plant stoichiometry. *Methods Ecol. Evol.* 10(5):673–679. DOI: 10.1111/2041-210X.13143.
- Hlatshwayo, M.S. y P.K. Wahome. 2010. Effects of shading on growth, flowering and cut flower quality in carnation (*Dianthus caryophyllus*). *J. Agric. Soc. Sci.* 6:34-38.
- Huang, J., S. Romero-Torres y M. Moshghbar. 2010. Practical considerations in data pre-treatment for NIR and raman spectroscopy. *Am. Pharmaceut. Rev.* 13(6):116-127.
- Huché-Thélier, L., L. Crespel, J. Le Gourrierec, P. Morel, S. Sakr, N. Leduc. 2016. Light signaling and plant responses to blue and UV radiations - Perspectives for applications in horticulture. *Environ. Exp. Bot.*, 121:22-38. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2015.06.009 0098-8472.
- Hueni, A. 2006. Field spectroradiometer data: acquisition, organization, processing and analysis on the example of New Zealand native plants. Tesis de maestría. Philosophy in earth science. Massey University, Palmerston North, Nueva Zelanda.
- Ilic, Z., L. Milencovic., L. Sunic y E. Fallik. 2015. Effect of coloured shade nets on plant leaf parameters and tomato fruit quality. *J. Sci. Food Agric.* 95(13):2660-2667. DOI: 10.1002/jsfa.7000.



- Inoue, K., R. Nishihama y T. Kohchi. 2017. Evolutionary origin of phytochrome responses and signaling in land plants. *Plant Cell Environ.* 40(11):2502-2508. DOI: 10.1111/pce.12908.
- Kamilaris, A., A. Kartakoullis y F.X. Prenafeta-Boldú. 2017. A review on the practice of big data analysis in agriculture. *Comput. Electron. Agr.* 143:23-37. DOI: 10.1016/j.compag.2017.09.037.
- Karentz, D. 1991. Ecological considerations of Antarctic ozone depletion. *Antarct. Sci.* 3(1):3-11. DOI: 10.1017/S0954102091000032.
- Karmas, A., A. Tzotsos y K. Karantzalos. 2016. Geospatial big data for environmental and agricultural applications. pp 353-390. En: Yu, S. y S. Guo (eds.). *Big data concepts, theories, and applications*. Heidelberg: Springer International Publishing. 437p. DOI:10.1007/978-3-319-27763-9\_10.
- Khan, A.A., 1975. Primary, preventive and permissive roles of hormones in plant systems. *The Bot. Rev.* 41(4):391-420.
- Klement, E., P. Gyula y A. Viczián. 2019. Detection of phytochrome phosphorylation in plants. pp. 41-67. En: Hiltbrunner, A. (ed.). *Phytochromes*. Nueva York: Humana. 278p.
- Kong, S.G. y K. Okajima. 2016. Diverse photoreceptors and light responses in plants. *J. Plant Res.* 129(2):111-114. DOI: 10.1007/s10265-016-0792-5.
- Lehnert, L. W., H. Meyer, W.A. Obermeier, B. Silva, B. Regeling y J. Bendix. 2019. Hyperspectral data analysis in R: the hsdar Package. *J. Stat. Softw.* 89(12):1-22. DOI: 10.18637/jss.v089.i12.
- Li, F.W., M. Melkonian, C.J. Rothfels, J.C. Villarreal, D.W. Stevenson, S.W. Graham, G.K.S. Wong, K.M. Pryer y S. Mathews. 2015. Phytochrome diversity in green plants and the origin of canonical plant phytochromes. *Nat. Commun.* 6:7852. DOI: 10.1038/ncomms8852.
- Lin, Y.J., Y.C. Chen, K.C. Tseng, W.C. Chang y S.S. Ko. 2019. Phototropins mediate chloroplast movement in *Phalaenopsis aphrodite* (Moth Orchid). *Plant Cell Physiol.* 60(10):2243-2254. DOI: 10.1093/pcp/pcz116.
- Lokers, R., R. Knapen, S. Janssen, van Y. Randen y J. Jansen. 2016. Analysis of big data technologies for use in agro-en-

- vironmental science. *Environ. Modell. Softw.* 84:494-504. DOI: 10.1016/j.envsoft.2016.07.017.
- Lowe, A., N. Harrison y A.P. French. 2017. Hyperspectral image analysis techniques for the detection and classification of the early onset of plant disease and stress. *Plant Methods.* 13(80):1-15. DOI: 10.1186/s13007-017-0233-z.
- Madrigal S., M. 2011. Calidad de fruto y semilla de pimiento morrón cv. Capistrano y chilaca cv. Joe Parker producidos bajo mallas fotoselectivas. Tesis de grado. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.
- Mahlein, A.-K., E.-C. Oerke, U. Steiner y H.-W. Dehne. 2012. Recent advances in sensing plant diseases for precision crop protection. *Eur. J. Plant Pathol.* 133(1):197-209. DOI: 10.1007/s10658-011-9878-z.
- Mahlein, A.-K., T. Rumpf, P. Welke, H.-W. Dehne, L. Plümer, U. Steiner y E.-C. Oerke. 2013. Development of spectral indices for detecting and identifying plant diseases. *Remote Sens. Environ.* 128:21-30. DOI: 10.1016/j.rse.2012.09.019.
- Mahlein, A.-K., M. T. Kuska, S. Thomas, D. Bohnenkamp, E. Ali-saac, J. Behmann, M. Wahabzada y K. Kersting. 2017. Plant disease detection by hyperspectral imaging: from the lab to the field. *Adv. Anim. Biosci.* 8(2):238-243. DOI: 10.1017/S2040470017001248.
- Martínez-Martínez, V., J. Gomez-Gil, M.L. Machado y F.A.C. Pinto. 2018. Leaf and canopy reflectance spectrometry applied to the estimation of angular leaf spot disease severity of common bean crops. *PLOS ONE.* 13(4):e0196072. Disponible en: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0196072>; consulta: febrero de 2020. DOI: 10.1371/journal.pone.0196072.
- Meisel, L.A., D.C. Urbina y M.E. Pinto. 2011. Fotorreceptores y respuestas de plantas a señales lumínicas. Capítulo XVIII. En: Squeo, F.A. y L. Cardemil (eds.). *Fisiología vegetal*. La Serena, Chile: Ediciones Universidad de La Serena.
- Metzger, J.D. 1995. Hormones and reproductive development. pp. 617-648. En: Davies, P.J. (ed.). *Plant hormones: physiology, biochemistry and molecular biology*. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher. 833p.





- Miyazaki, Y., T. Takase y T. Kiyosue. 2015. ZEITLUPE positively regulates hypocotyl elongation at warm temperature under light in *Arabidopsis thaliana*. Plant Signal Behav. 10(5):e998540. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15592324.2014.998540>; consulta: febrero de 2020. DOI: 10.1080/15592324.2014.998540.
- Nicolai, B.M., K. Beullens, E. Bobelyn, A. Peirs, W. Saeys, K. I. Theron y J. Lammertyn. 2007. Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: A review. Postharvest Biol. Technol. 46(2):99-118. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2007.06.024.
- Ovadia, R., I. Dori, A. Nissim-Levi, Y. Shahak y M. Oren-Shamir. 2009. Coloured shade-nets influence stem length, time to flower, flower number and inflorescence diameter in four ornamental cut-flowers crops. J. Hortic. Sci. Biotechnol. 84(2):161-166. DOI: 10.1080/14620316.2009.11512498.
- Páez O., M.C. 2018. Efecto de mallas fotoselectivas de colores en el desarrollo de plantas de rosa en condiciones de invernadero en la sabana de Bogotá. Trabajo de grado. Ingeniería Agronómica, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Bogotá, Colombia.
- Peñuelas, J. y I. Filella. 1998. Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. Trends Plant Sci. 3(4):151-156. DOI: 10.1016/S1360-1385(98)01213-8.
- Pham, V.N., P.K. Kathare y E. Huq. 2018. Phytochromes and phytochrome interacting factors. Plant Physiol. 176(2):1025-1038. DOI: 10.1104/pp.17.01384.
- Qu, J.-H., D. Liu, J.-H. Cheng, D.-W. Sun, J. Ma, H. Pu y X.-A. Zeng. 2015. Applications of near-infrared spectroscopy in food safety evaluation and control: a review of recent research advances. Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 55(13):1939-1954. DOI: 10.1080/10408398.2013.871693.
- Ramírez-Gil, J.G., G.O.G. Martínez y J.G. Morales-Osorio. 2018. Design of electronic devices for monitoring climatic variables and development of an early warning system for the avocado wilt complex disease. Comput. Electron. Agr. 153:134-43. DOI: 10.1016/j.compag.2018.08.002.

- Raven, P.H., R.F. Evert y S.E. Eichhorn. 1992. Biología de las plantas. Barcelona: Editorial Reverté S.A. 402p.
- Reyes V., F., L.F. Cruz A., N.P. Cáceres V. y E.H. Valero G. 2017. Desempeño del sector floricultor. Informe. Superintendencia de sociedades. Bogotá D.C. Colombia. 8p.
- Rinnan, Å., F. van den Berg y S. B. Engelsen. 2009. Review of the most common pre-processing techniques for near-infrared spectra. Trends Anal. Chem. 28(10):1201-1222. DOI: 10.1016/j.trac.2009.07.007.
- Robnik-Šikonja, M. y I. Kononenko. 2003. Theoretical and Empirical Analysis of ReliefF and RReliefF. Mach. Learn. 53(1-2):23-69. DOI: 10.1023/A:1025667309714.
- Rodríguez, M. y D. Minerva. 2015. Shading nets effect on the production and quality of blueberry fruit (*Vaccinium corymbosum* L.) cv. Brigitta. Sci. Agropecu. 6(1):41-50. DOI: 10.17268/sci.agropecu.2015.01.04.
- Rosen Tantau. 2018. Productos: Rosas estándar. Disponible en: [www.rosentantau.com](http://www.rosentantau.com); consulta: abril de 2018.
- Rumpf, T., A.-K. Mahlein, U. Steiner, E.-C. Oerke, H.-W. Dehne y L. Plümer. 2010. Early detection and classification of plant diseases with Support Vector Machines based on hyperspectral reflectance. Comp. Electron. Agr. 74(1):91-99. DOI: 10.1016/j.compag.2010.06.009.
- Sandak, J., A. Sandak y R. Meder. 2016. Assessing trees, wood and derived products with near infrared spectroscopy: hints and tips. J. Near Infrared Spectrosc. 24(6):485-505. DOI: 10.1255/jnirs.1255.
- Sankaran, S., A. Mishra, R. Ehsani y C. Davis. 2010. A review of advanced techniques for detecting plant diseases. Comput. Electron. Agr. 72(1):1-13. DOI: 10.1016/j.compag.2010.02.007.
- Savitzky, A. y M.J.E. Golay. 1964. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. Anal. Chem. 36(8):1627-1639. DOI: 10.1021/ac60214a047.
- Schroeter-Zakrzewska A., T. Kleiber y P. Zakrzewski. 2017. The response of chrysanthemum (*Chrysanthemum X Grandiflorum* Ramat./Kitam) cv. Covington to a different range of fluorescent and LED light. J. Elem. 22(3):1015-1026. DOI: 10.5601/jelem.2017.22.1.1252.



- Shahak, Y. 2008. Photo-selective netting for improved performance of horticultural crops. A review of ornamental and vegetable studies carried out in Israel. *Acta Hortic.* 770:161-168. DOI: 10.17660/ActaHortic.2008.770.18.
- Shahak, Y., E.E. Gussakosky, E. Gal y R. Ganelevin. 2004. Colornets: crop protection and light-quality manipulation in one technology. *Acta Hortic.* 659:143-151. DOI: 10.17660/ActaHortic.2004.659.17.
- Skoog, F. y C.O. Miller. 1957. Chemical regulation of growth and organ formation in plant tissues cultured *in vitro*. En: *Biological Action of Growth Substances. Symp. Soc. Exp. Biol.*, Cambridge University Press. 11:118-31.
- Song, K. y G. Choi. 2019. Phytochrome regulation of seed germination. pp. 149-156. En: Hiltbrunner, A. (ed.). *Phytochromes*. Nueva York: Humana. 278p.
- Steidle N., A.J., J.A.S. Grossi, D.C. Lopes y E.A. Anastácio. 2009. Potential of spectral reflectance as postharvest classification tool for flower development of calla lily (*Zantedeschia aethiopica* (L.) Spreng.). *Chil. J. Agr. Res.* 69(4):588-592. DOI: 10.4067/S0718-58392009000400015.
- Taoka, K.-I., I. Ohki, H. Tsuji, C. Kojima y K. Shimamoto. 2013. Structure and function of florigen and the receptor complex. *Trends Plant. Sci.* 18(5):287-293. DOI: 10.1016/j.tplants.2013.02.002.
- Thomas, B. 1993. The role of phytochrome and other photoreceptors in the control of flowering in long-day plants. *Flowering Newsletter - J. Exp. Bot.* 16:6-10.
- Tilbrook, K., A.B. Arongaus, M. Binkert, M. Heijde, R. Yin y R. Ulm. 2013. The UVR8 UV-B photoreceptor: Perception, signaling and response. *ASPB. The Arabidopsis Book*: e0164. DOI: 10.1199/tab.0164
- Tyagi, A.C. 2016. Towards a second green revolution. *Irrig. Drain.* 65(4):388-9. DOI: 10.1002/ird.2076.
- Uliasz, A.T. y R.D. Vierstra. 2011. Phytochrome structure and photochemistry: recent advances toward a complete molecular picture. *Curr. Opin. Plant Biol.* 14(5):498-506. DOI: 10.1016/j.pbi.2011.06.002.

- Valera, D., F. Molina y J. Gil. 2001. Las mallas como técnicas de control climático en invernadero. *Vida Rural*.139:50-52.
- Vince-Prue, D. 1975. Photoperiodism in plants. Londres: McGraw Hill. 444p.
- Wang, J., X. Du, W. Pan, X. Wang y W. Wu. 2015. Photoactivation of the cryptochrome/photolyase superfamily. *J. Photochem. Photobiol. C*. 22:84-102. DOI: 10.1016/j.jphotochemrev.2014.12.001.
- Wang, Q., Z. Zuo, X. Wang, Q. Liu, L. Gu, Y. Oka y C. Lin. 2018. Beyond the photocycle-how cryptochromes regulate photoresponses in plants? *Curr. Opin. Plant Biol.* 45:120-126. DOI: 10.1016/j.pbi.2018.05.014.
- Wang, Y., S.A. Maruhnich, M.H. Mageroy, J.R. Justice y K.M. Folta. 2013. Phototropin 1 and cryptochrome action in response to green light in combination with other wavelengths. *Planta*. 237(1):225-237. DOI: 10.1007/s00425-012-1767-y.
- Weber, R.H. y R. Weber. 2010. Internet of things: Legal perspectives. Nueva York: Springer International Publishing. 135p.
- West, J.S., C. Bravo, R. Oberti, D. Lemaire, D. Moshou y H.A. McCartney. 2003. The potential of optical canopy measurement for targeted control of field crop diseases. *Annu. Rev. Phytopathol.* 41:593-614. DOI: 10.1146/annurev.phyto.41.121702.103726.
- Xiao-Li, C., G. Wen-Zhong, X. Xu-Zhang, W. Li-Chun y Q. Xiao-Jun. 2014. Growth and quality responses of ‘Green Oak Leaf’ lettuce as affected by monochromic or mixed radiation provided by fluorescent lamp (FL) and light-emitting diode (LED). *Sci. Hortic.* 172:168-175. DOI: 10.1016/j.scienta.2014.04.009.
- Yamamoto, K., T. Togami y N. Yamaguchi. 2017. Super-resolution of plant disease images for the acceleration of image-based phenotyping and vigor diagnosis in agriculture. *Sensors*. 17(11). pii: E2557. DOI: 10.3390/s17112557.



# INGENIERÍA EN AUTOMATIZACIÓN

Snies: 55200



VIGILADA MINEDUCACIÓN

## LA INTEGRACIÓN DE LA TECNOLOGÍA EN LA AGROINDUSTRIA

Más información: [iautomatizacion@lasalle.edu.co](mailto:iautomatizacion@lasalle.edu.co) | PBX: 353 5360, ext.: 2522- 2523

[www.lasalle.edu.co](http://www.lasalle.edu.co)



U.deLaSalle



@unisalle



@unisallecol



# 9

## CAPÍTULO



# Automatización y control en procesos de clasificación y empaque en flores de corte\*

Jairo Orlando Montoya Gómez<sup>1</sup>, José Luis Rubiano Fernández<sup>2</sup>,  
Jorge Eliécer Rangel Díaz<sup>3</sup> y Pedro Fernando Martín Gómez<sup>4</sup>

## RESUMEN

**La etapa de poscosecha de las rosas** para exportación es intensiva en el uso de mano de obra, para lograr realizar la entrega a tiempo, según acuerdos previamente establecidos con los comercializadores de estas flores. En algunas ocasiones, por diversas causas, la mano de obra es insuficiente para cumplir con los contratos de entrega, lo que puede conducir a incumplir contratos de entregas de rosas en un tiempo especificado, generando cuantiosas pérdidas económicas, de producto y de mercado. Esta situación se convierte en una oportunidad para desarrollar tecnologías aplicadas al agro, usando conceptos de automatización en la poscosecha, para cubrir la mano de obra faltante en un momento dado. El objetivo del proyecto consiste en desarrollar un sistema automático para transporte, clasificación, refilado y embalaje de flores. La metodología involucró: indagación sobre el mercado de flores en Colombia y en el mundo; determinación de los parámetros requeridos por los productores; búsqueda de información sobre trabajos similares;

299

\* Para citar este capítulo: Montoya G., J.O., J.L. Rubiano F., J.E. Rangel D. y P.F. Martín G. 2021. Automatización y control en procesos de clasificación y empaque en flores de corte. En: Flórez R., V.J. (ed.). Productos relevantes del proyecto Fortalecimiento de la competitividad del sector floricultor colombiano mediante el uso de ciencia, tecnología e innovación aplicadas en Cundinamarca. Bogotá: Ediciones Unisalle, Ceniflores. pp. 298-327. Este capítulo de libro se formuló con base en Castro, P. 2017. Diseño de un sistema de identificación y clasificación de flores. Trabajo de grado. Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia.

1. Ingeniero electromecánico, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, sede Duitama. Magíster en Ingeniería Mecánica, Universidad de los Andes. Profesor asociado de la Facultad de Ingeniería, Ingeniería en Automatización. Universidad de La Salle, Bogotá, D.C. Correo electrónico: jamontoya@unisalle.edu.co - ORCID: 0000-0001-7594-3095.

2. Ingeniero mecánico, Universidad de los Andes, Bogotá. Magíster en Materiales y Procesos de Manufactura, Universidad Nacional de Colombia. Profesor asistente de la Facultad de Ingeniería, Ingeniería en Automatización. Universidad de La Salle, Bogotá, D.C. Correo electrónico: jorubiano@unisalle.edu.co - ORCID: 0000-0002-6557-3390.

3. Ingeniero electrónico, Universidad Manuela Beltrán, Bogotá. Doctor en Ingeniería Mecánica, Universidad Federal de Uberlândia - UFU. Profesor asociado de la Facultad de Ingeniería, Ingeniería en Automatización. Universidad de La Salle, Bogotá, D.C. Correo electrónico: jorangel@unisalle.edu.co - ORCID: 0000-0001-7746-8232.

4. Ingeniero mecánico, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Doctor en Ingeniería Mecánica, Universidad Federal de Uberlândia - UFU. Profesor asociado de la Facultad de Ingeniería, Ingeniería en Automatización. Universidad de La Salle, Bogotá, D.C. Correo electrónico: pmartin@unisalle.edu.co - ORCID: 0000-0001-6928-9090.





desarrollo del diseño conceptual de la solución y diseño a nivel de sistema. Como resultado, se obtuvo el diseño de un sistema de clasificación y empaque de rosas para exportación que se ajusta a los requerimientos inicialmente establecidos.

**Palabras clave:** *automatización del agro, diseño, parámetros de clasificación de rosas, Rosa x hybrida.*

## ABSTRACT

**The postharvest stage of roses** for export is intensive in the use of labor, to deliver the roses at the time, according to the agreements previously established with their marketers. On some occasions, for various reasons, labor is insufficient to comply with established contracts, which can lead to breach of flower delivery contracts in a specified time, generating large economic, product and market losses. This situation becomes an opportunity to develop technologies applied to agriculture, using postharvest automation concepts, to cover the missing workforce at any given time. The objective of the project is to develop an automatic system for transport, classification, refining and packaging of flowers. The methodology involved: information on the Colombian and world flower market, modification of the parameters required by the producers, search for information on similar works, development of the conceptual design of the solution and design at the system level. As a result, the design of a system of classification and packing of roses for export was obtained, which conforms to the established requirements.

**Keywords:** *agricultural automation, design, classification parameters of roses, Rosa x hybrida.*



# Introducción

A finales de la década de los años 1960, Colombia encontró en la floricultura una buena oportunidad de inversión, dando inicio a uno de los sectores más importantes como generadores de empleo directo en el campo, con aproximadamente 13,9 personas por hectárea, y que en la actualidad colocan al país en un puesto privilegiado en el ámbito internacional, pues es el segundo exportador de flores a nivel mundial, con 16,2 % de este mercado, después de los países bajos (Fenalco, 2017).

Los cultivos de flores en Colombia se realizan con altos estándares de calidad que aseguran los mejores tamaños, colores y conservación de las flores. Adicionalmente, cuenta con la mayor variedad de flores exóticas y tipo exportación del mundo, lo que ubica al país a la vanguardia de las tendencias de consumo mundiales. Es un sector con más de 40 años de experiencia exportadora y con alto impacto social, pues genera más de 120 000 empleos directos y vincula alrededor del 25 % de la mano de obra rural femenina. Así mismo, involucra programas de sostenibilidad medioambiental (ProColombia, 2020).

Colombia exporta flores a más de 100 países, y Estados Unidos ha sido el destino más importante de exportación de flores de corte, con una participación en dicho mercado de 77,9 % en 2016, y las rosas como el principal tipo de flor exportado. El origen de las exportaciones de flores es coherente con los de mayor producción: Cundinamarca y Bogotá con 79 % y Antioquia con el 21 %. Las exportaciones restantes se distribuyen entre Cauca, Valle del Cauca, Caldas, Bolívar, Risaralda y Boyacá principalmente (Fenalco, 2017).

Para lograr la alta calidad que ha conseguido la industria de la floricultura en Colombia, con gran aceptación y penetración en el mercado, el sistema productivo de flores de corte y su área de poscosecha en particular se han organizado de tal forma que involucran los siguientes aspectos, según lo descrito, para algunos cultivos de flores de corte en la Sabana de Bogotá, por Urrea y Torres (2008):



**La floricultura en Colombia cuenta con estándares de calidad que aseguran tamaños, colores y conservación de las flores; el área poscosecha ha logrado alta calidad, con gran aceptación y penetración en el mercado.**





Aunque en la actualidad existen máquinas automáticas importadas para empaque de flores, como aporte al desarrollo tecnológico del sector floricultor, se diseñó y construyó una máquina de clasificación y empaque de rosas.

- 1) Parámetros de los tratamientos poscosecha de flores, donde se tienen en cuenta el tipo de flor, el tipo de tratamiento y el tipo de empaque.
- 2) Normas generales de clasificación de flores, donde se manejan los criterios de punto de corte, que depende del consumidor final y el grado de calidad, que es la relación entre la longitud del tallo, tamaño del botón floral, cantidad de flores, consistencia y el peso del ramo.
- 3) Características operacionales de la poscosecha de flores, donde se tienen en cuenta: (i) las condiciones generales, tales como tamaño de sala, temperatura, aireación, humedad e iluminación, y (ii) infraestructura, que incluye: carros de corte, transporte de la flor a la poscosecha, soportes para las cajas con flores que esperan en la sala, mesas de clasificación, recipientes para el tratamiento, cuartos fríos, zona de carga, tiempos y movimientos, y automatización y mecanización de la poscosecha.
- 4) Administración de la poscosecha, involucrándose personal y manejo de personal, y
- 5) Control de calidad, que involucra: recepción de flor del cultivo, clasificación y elaboración, inspección y tratamiento de los ramos, el cual tiene en cuenta calidad del agua, composición química, dosis y duración del tratamiento, asepsia de los recipientes, empaque y manejo de cuarto frío.

En la actualidad, existen máquinas automáticas importadas para el empaque de flores tales como tulipanes y gerberas, entre otras, las cuales proceden a “bonchear” tallos florales y zunchar las cajas. El término “bonchear” significa la elaboración o confección de un ramo, que consiste en juntar cantidades variables de tallos florales en grupos según el distribuidor, que se sujetan con una liga o caucho elástico para formar un ramo o *bunch*; las cajas de empaque, en algunos casos se zunchan, es decir, se fijan con flejes o zunchos, bien sean metálicos o plásticos, tensados con un gancho especial de amarre. Estas máquinas se utilizan en Europa, y su implementación en Colombia hace que el país sea dependiente técnica y económicamente de los fabricantes.

Debido a la importancia económica y sostenible que tiene para el país este sector, y a que los floricultores colombianos llevan a cabo todo el proceso de producción y empaque, y, posteriormente, exportan de manera atomizada sus productos (es decir, existen varios intermediarios para llevar el producto al consumidor final), se busca tecnificar los procesos de producción de tal manera que se pueda apoyar la labor manual y fortalecer las dinámicas de exportación, al permitir el incremento de tallos empacados con una misma cantidad de mano de obra disponible, además de generar desarrollo tecnológico en el sector floricultor.

## 9.1 Desarrollo del diseño conceptual de la solución

Como aporte al desarrollo tecnológico mencionado, se diseñó y construyó una máquina de clasificación y empaque de rosas, que sirva como apoyo, cuando así se requiera. Los pasos seguidos se describen a continuación.

303

### 9.1.1 Características y restricciones en el proceso de poscosecha

En cada paso se detallan características y sus respectivas restricciones.

#### 9.1.1.1 Transporte

Se deben transportar rosas en forma vertical desde el punto de recolección hasta la zona de clasificación, separadas 0,25 m entre ellas, con velocidad de transporte ajustable según requerimientos de producción. Los elementos de soporte para tallos florales de rosa del sistema de transporte deben permitir la fácil colocación de las rosas por parte del operario, con el fin de no producir daño a la flor, al tallo o al follaje.



### 9.1.1.2 Clasificación

Se debe definir un sistema de clasificación que se adapte al sistema de transporte, teniendo en cuenta la velocidad con la que se transportan los tallos florales de rosa y las condiciones de iluminación requeridas en el sistema de clasificación. Como la clasificación involucra el determinar las características físicas de la flor, se hace por método visual, por lo que se considera un sistema de visión que permita ajustar los parámetros de clasificación de acuerdo con la categoría de flor por inspeccionar.

### 9.1.1.3 Agrupamiento y embalaje

Para el empaque automatizado, los tallos florales de rosa se agrupan en paquetes de 24 unidades, organizadas en tres niveles de ocho flores cada uno, siguiendo la forma de empaque de algunos comercializadores. Para el embalaje, se emplean separadores de cartón grueso para generar grupos de ocho flores, y así evitar el contacto entre los grupos de flores para reducir el maltrato por contacto entre pétalos. Para su aislamiento del exterior, se utiliza un cartón corrugado que protege el grupo de flores para su transporte. A los tallos florales, después de ser empacados y agrupados, se les hace un corte en la parte inferior del tallo, para ajustarse a la dimensión requerida según el grado de calidad.

## 9.2 Definición estructural del sistema de transporte desde el cultivo hasta el punto de acopio

Algunos trabajos relacionados con el diseño de sistemas de transporte de materiales, consultados y extraídos de bases de datos, son los siguientes.

Valencia (2013) diseñó un sistema que permite el transporte de los insumos, herramientas y recolección de la cosecha, entre puntos significativamente lejanos, es decir, donde se encuentran la materia prima y las zonas de trabajo. Lo anterior, con el fin de disminuir la fuerza de trabajo, mejorar la productividad y los tiempos empleados en el desarrollo de dichas ac-

tividades. Cely y Meneses (2005) diseñaron y construyeron un sistema de transporte de una cuchara de fundición, para reemplazar el sistema manual empleado, realizado por cinco operarios. Se definieron los requisitos y las delimitaciones que se tuvieron en cuenta para el diseño y la construcción. Adicionalmente, se evaluaron algunas posibilidades de sistemas de transporte como grúa-pórtico, puente grúa de doble viga eléctrico, puente grúa de viga sencilla, y se estudiaron las ventajas y desventajas de cada uno. Asimismo, Vicente (2009) diseñó un transportador aéreo teleférico bicable de vaivén, donde se muestran los cálculos del cable carril, determinando el diámetro y tensión que este debe soportar, además de cada uno de los elementos del sistema de transporte, con lo que se puede conocer en detalle el costo que implica la construcción del sistema.

Después de analizar los diferentes tipos de transporte de materia prima, se tomó la decisión de elaborar uno de tipo suspendido.

### 9.2.1 Sistema de transporte suspendido

Este sistema de transporte permite el traslado de materiales a través de un proceso, siendo apropiado por sus características para el transporte a grandes distancias. Consiste en un riel elevado, en el cual se soportan y deslizan carritos conectados entre sí por una cadena o un cable. El camino está determinado por el sistema de rieles, formando un recorrido con tramos rectos con giros y cambios de elevación siguiendo la cadena o cable el mismo recorrido, utilizando ruedas dentadas o poleas para la transmisión de potencia y el cambio de dirección de movimiento, configurando un lazo sin fin. De cada carrito puede colgar el elemento por transportar (carga) mediante la utilización de ganchos, cestas u otros receptáculos para la carga. El sistema de carros suspendidos es empleado a menudo en fábricas para mover piezas y conjuntos de ensamblaje entre los principales departamentos de producción. Este sistema de transporte se compone de los elementos que se describen a continuación.



La clasificación determina características físicas de la flor por método visual, por lo que se consideró un sistema de visión para ajustar parámetros de clasificación de acuerdo con la categoría de flor por inspeccionar.



### 9.2.1.1 Cadena

Constituida por una serie de eslabones metálicos enlazados entre sí. Se utiliza, entre otros, para la transmisión de energía y transporte en los sistemas mecánicos.

### 9.2.1.2 Engranajes rectos

Se usan para la transmisión de potencia y para realizar cambios de dirección. Los materiales empleados para estos elementos pueden ser acero AISI tipo 1020, 1040 o 4140. También se utilizan polímeros de tipo HDPE, nylon o teflón.

### 9.2.1.3 Trolley

Carrito para el sistema de transporte de tallos florales de rosa. Compuesto de una estructura de soporte, rodamientos y ruedas para su apoyo y un suave traslado sobre un soporte guía. Están conectados a las cadenas de transporte para su desplazamiento dentro del entorno de trabajo. Pueden equiparse con chips RFID o códigos de barras para su identificación y control.

### 9.2.1.4 Columnas

Elementos prismáticos verticales que soportan cargas axiales, que son las encargadas de sostener todo el conjunto de componentes del sistema de transporte. Apoyadas verticalmente en el suelo, soportan cargas de compresión axial. Deben satisfacer requisitos específicos de resistencia, deflexión y estabilidad (Beer *et al.*, 2010).

### 9.2.1.5 Perfil IPE

Perfil en I, con dimensiones según la norma DIN 1025 y con tolerancias de producción definidas según la norma EN 10034: 1993. Es un producto laminado cuya sección tiene forma de doble T, también llamado I, y con el espesor denominado europeo. Las caras exteriores e interiores de las alas, de espesor constante, son paralelas entre sí y perpendiculares al alma. Este perfil se utiliza para el soporte y guía de los *trolleys*.

### 9.2.1.6 Motor eléctrico

Encargado de proporcionar el accionamiento primario al sistema de transporte de tallos florales de rosa (movimiento de cadena y *trolleys*). Para su escogencia, se tienen en cuenta la potencia mecánica requerida por el sistema de transporte, la velocidad de operación del transporte del material vegetal y el grado de protección dependiendo del ambiente de operación.

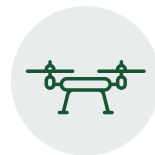
### 9.2.1.7 Controlador lógico programable (PLC)

Es un dispositivo electrónico digital industrial que, por medio de una memoria programable para guardar instrucciones (programas) y sensores, realiza control (funciones lógicas) y operación de máquinas industriales (motores o accionadores, entre otros), que ejecutan secuencialmente las instrucciones especificadas, generando así unas señales de mando, a partir de las señales captadas por los sensores y emitidas al controlador. Esta secuencia se ejecuta continuamente para conseguir el control actualizado del proceso. Es utilizado dentro del proceso de transporte para regular la velocidad de desplazamiento de los *trolleys*, de acuerdo con la productividad requerida. Para la escogencia del PLC más adecuado se tienen en cuenta: 1) la robustez, es decir, la capacidad para operar en diferentes ambientes adversos, presentando un ciclo de vida largo; 2) la flexibilidad, o facilidad de adaptación a cambios que se presenten en el diseño de los diferentes procesos a los que se encuentra asociado; además, tiene la opción de expansión de módulos, lo cual permite agregar nuevas señales de entrada, salida y control al proceso; 3) la versatilidad, esto es, la adaptación a una variedad de aplicaciones y requerimientos a nivel industrial, como la integración a redes de comunicación industrial, periferia descentralizada, PC industriales e implementación de sistemas supervisores por medio de interfaces con pantallas interfaz humano máquina (HMI, por sus siglas en inglés) (Bolton, 2013).

### 9.2.1.8 Variador de velocidad

Dispositivo utilizado para generar un arranque y parada suave de un motor eléctrico, además de que permite modificar la velocidad de giro u operación por medio de la variación

307



Un controlador lógico programable es un dispositivo electrónico digital industrial que realiza control y operación de máquinas que ejecutan secuencialmente instrucciones, para lograr el control actualizado del proceso.





de la frecuencia de la corriente de alimentación al motor. Por lo anterior, es posible variar la cantidad de flores que se transportan por unidad de tiempo en el sistema; el variador se selecciona de acuerdo con la potencia mecánica requerida por el sistema de transporte.

## 9.3 Determinación del sistema de clasificación

Antes de realizar el diseño detallado del sistema de clasificación de tallos florales individuales, es necesario conocer los componentes que conforman el sistema de clasificación. Este sistema se ubica entre el sistema de transporte y el sistema de empaque.

### 9.3.1 Parámetros de clasificación de los tallos florales de rosa



Según las características de apertura de flor y longitud de tallo, se opta por trabajar con una tecnología de visión de máquina que permita el reconocimiento de formas, para establecer los parámetros especificados.

Los parámetros tenidos en cuenta por los productores para una adecuada clasificación son: tamaño del botón, longitud-grosor del tallo (consistencia) y peso.

De acuerdo con Torres (2011), los tallos florales de rosa se clasifican según el grado de calidad, que considera la relación entre longitud del tallo, tamaño del botón, consistencia y peso. La forma de determinar dicho grado es por medio de plantillas, de tal forma que una plantilla permite establecer el grado por apertura de la flor, comparando esta contra barras de diferentes anchuras, y otra plantilla hace posible determinar el grado por longitud del tallo. Según Torres (2011), existen diferentes formas de clasificar las rosas tipo exportación para su comercialización. En la tabla 9.1 se muestra la relación entre los grados de calidad basados en la longitud del tallo y el tamaño del botón o cabeza floral.

➔ **Tabla 9.1** Grado de calidad según longitud del tallo para la clasificación de las rosas tipo exportación.

GRADO	TAMAÑO BOTÓN	
	Pequeño (cm)	Grande (cm)
70	5,0	5,2
60	4,7	5,0
50	4,5	4,7
40	4,3	4,5

FUENTE: Torres (2011)

De acuerdo con las características especificadas de apertura de flor y longitud de tallo, se opta por trabajar con una tecnología de visión de máquina que permita el reconocimiento de formas, con el fin de establecer los parámetros especificados. Para llegar a una selección adecuada por medio del sistema de visión de máquina, a continuación se describe cómo se realiza el proceso de clasificación actual.

309

### 9.3.2 Sistemas de clasificación de tallos florales de rosa

Hoy en día, la clasificación de tallos florales en la poscosecha de rosa es completamente manual. El sistema de clasificación por desarrollar utiliza tecnología de visión de máquina, el cual consiste en el empleo de una cámara industrial (programable) para determinar los parámetros (grados de calidad) de clasificación de los tallos florales de rosa. Para programar la cámara con fines de clasificación se requiere embeber un *software* (LabVIEW) dentro de su procesador, lo cual se hace a través de un sistema digital, un computador con las interfaces apropiadas. A continuación, se describen los dos sistemas de clasificación de tallos florales.

#### 9.3.2.1 Descripción del proceso actual de clasificación (modo manual)

El proceso se inicia con el corte de los tallos florales en el cultivo, donde el operario realiza un primer control de calidad, descartando los tallos demasiado delgados o



torcidos, inadecuados para la exportación; luego, los tallos florales son ubicados en mallas que se enrollan, y la malla así envuelta se ubica en cajas de cartonplast, denominadas “tabacos”, cada uno con aproximadamente 24 tallos florales. Un operario se encarga del traslado de los *tabacos* desde el área de cultivo hasta el área de poscosecha, donde se llevan a cabo las siguientes acciones: (i) *recepción de tabacos*: estos son apilados cerca de los puestos de clasificación, el operario toma cada tabaco, le retira la tapa y lo ubica en una base cerca de la plantilla de clasificación; (ii) *inspección*: el operario toma cada uno de los tallos florales y examina si hay evidencias de la presencia de plagas o enfermedades, o torceduras en el tallo, para el posible descarte de la flor; en seguida, según se requiera, realiza el despétale de la flor y el deshoje parcial en los tallos florales de rosa aceptados; (iii) *detección de parámetros*: a continuación, para su clasificación, el operario posiciona el tallo floral en la plantilla que permite determinar la longitud de tallo y el grado de apertura del botón, y revisa que estos parámetros sean acordes con la cosecha programada; (iv) *ubicación*: por último, ubica cada tallo floral de acuerdo con su grado de calidad en un estante o árbol de clasificación, donde los tallos se apilan, para pasar al proceso de empaque.

El operario toma los tallos florales del estante y los empaqueta en grupos de veinticinco, colocándolos a continuación en una banda transportadora; en cada ramo se refilan los tallos a la longitud establecida según el grado de calidad, y se almacenan en cajas de cartón que se ubican en un cuarto de refrigeración, esperando a ser transportados hacia su destino final.

### 9.3.2.2 Clasificación por sistema de visión de máquina (desarrollado)

Consiste en la inspección y detección de parámetros, por medio de la captura de imagen del producto a través de una cámara, y posterior tratamiento de la imagen, con fines de clasificación. La ubicación se realiza por medio de sensores y actuadores neumáticos. A continuación se describen las fases requeridas en este proceso.

#### 9.3.2.2.1 Adquisición y digitalización de la imagen

Para adquirir la imagen de la flor por clasificar se emplea una cámara monocromática con un procesador ya programado, la cual capta la forma del objeto, en este caso la flor. De esta imagen y mediante técnicas de procesamiento se extraen los parámetros geométricos como: largo del tallo, altura del botón, diámetro del botón, apertura y consistencia. Esta información se envía al computador o a un elemento de control que puede ser un controlador lógico programable (PLC). Se emplean sensores y su capacidad para digitalizar la señal que produce.

#### 9.3.2.2.2 Procesamiento

Se modifica la imagen acabada de adquirir, con el fin de mejorarla de acuerdo con los parámetros por analizar, con los siguientes objetivos: eliminar ruido, acentuar o perfilar las características de una imagen, tales como bordes y límites, contrastar la imagen para que sea más útil la visualización gráfica y el análisis de esta, mejorar la calidad de algunas partes de imagen, y transformar la imagen a otro espacio de representación (Castro, 2017).

#### 9.3.2.2.3 Segmentación

Se divide la imagen en las partes que la constituyen o los objetos que la forman; en este proceso se diferencia el objeto y el fondo (Castro, 2017).

#### 9.3.2.2.4 Descripción

Este proceso etiqueta los objetos teniendo en cuenta la información suministrada por la inspección, que puede ser *cuantitativa* (mide áreas, longitudes, perímetros o ángulos de orientación), o *cualitativa* (verifica la correcta realización del trabajo, como el agrupamiento, el etiquetado, el empaquetado, entre otros) (Castro, 2017).

#### 9.3.2.2.5 Clasificación

Ubicación del elemento analizado en una cierta clasificación, con base en los datos capturados y examinados.



La forma de la flor se adquiere con cámara monocromática de procesador programado y con técnicas de procesamiento se extraen parámetros geométricos: largo del tallo, altura y diámetro del botón, apertura y consistencia.





El sistema de visión considera el tamaño del sensor de la cámara, porque el lente se debe ajustar al área del sensor para evitar el sombreado de la imagen. Se utilizó iluminación LED *Back light*, de tipo estroboscópico.

9.3.2.2.6 Toma de decisiones

Con base en el análisis previo, frecuentemente los sistemas de visión por computador controlan aparatos mecánicos que efectúan la manipulación de los productos después de ser clasificados (González *et al.*, 1996).

9.3.2.3 Criterios de selección del sistema de visión

Se tienen en cuenta: inspecciones que se requieren por segundo, rapidez con que se mueven las rosas, área de inspección, nivel de precisión que se requiere medir, múltiples puntos de vista que se desean tomar de la inspección, identificación de color y acciones que se quieren realizar con base en la identificación.

9.3.2.4 Elementos del sistema de visión

9.3.2.4.1 Lente de la cámara

Es indispensable para la selección de la óptica del sistema de visión tener en cuenta el tamaño del sensor de la cámara, en razón a que el lente se debe ajustar al área del sensor con el fin de evitar el sombreado de la imagen obtenida. Existen diferentes lentes de acuerdo con las dimensiones del objeto por inspeccionar. Los lentes (objetivos) ojo de pescado poseen rango angular amplio que puede llegar hasta 180° de apertura, con distancias focales desde 8 hasta 15 mm. Generalmente los lentes son objetos colocados a distancias focales entre 8 y 10 mm, producen imágenes circulares en cámaras *full frame*, y los que se encuentran cerca de los 15 mm pueden cubrir todo el sensor.

Los lentes gran angulares casi siempre son utilizados para paisajes, vistas panorámicas o fotos urbanas, donde se desea capturar una gran porción de la imagen; también se emplean a menudo para realizar fotografía de interiores. Se consideran gran angular los lentes con distancias focales entre 17 y 35 mm, y usualmente poseen un campo de visión a partir de 60°; los objetivos de distancia focal fija poseen solo una focal, no permitiendo realizar *zoom* (Castro, 2017). El *zoom* es el tipo de objetivo (lente) más utilizado, ya que per-

mite una mayor versatilidad al poseer un amplio rango focal (Fernández, 2015).

#### 9.3.2.4.2 Iluminación en el sistema de visión

Para elegir la iluminación del sistema de visión más adecuada es necesario tener en cuenta: aplicación, si es en blanco-negro o a color; velocidad de movimiento del tallo floral de rosa frente a la cámara; área necesaria de iluminación; geometría, estructura, reflectividad y color del objeto de estudio (tallo floral de rosa); vida útil de la luz, así como limitaciones mecánicas / condiciones ambientales (Castro, 2017). Para el sistema de visión se utilizó iluminación LED *Back light*, de tipo estroboscópico, normalmente empleada para la identificación de contornos.

#### 9.3.2.4.3 Actuadores

Son los encargados de efectuar la clasificación de los tallos florales de rosa. Existen distintos tipos de actuadores, por lo regular definidos según su fuente de alimentación: neumáticos, hidráulicos o eléctricos.

313

#### 9.3.2.4.4 Software del sistema de visión

Para programar el sistema de visión se utilizó un lenguaje de programación gráfica nativo, protocolo de internet (IP por sus siglas en inglés) integrado para análisis de datos y procesamiento de señales y una arquitectura abierta que permite la integración de cualquier dispositivo de hardware y cualquier enfoque de *software* (Castro, 2017). La plataforma empleada fue LabVIEW.

## 9.4 Descripción del sistema de agrupado, refilado y embalaje de flores

Para elaborar el sistema de empaque se analizaron los tipos de empaques para ramos de flores de corte en cosechas del sector floricultor en la Sabana de Bogotá. En este análisis se incluyó: tipo de empaque del grupo de flores,



material, complejidad de manipulación y tiempo requerido para llegar al destino de exportación. El diseño se centró en la conservación del tallo floral, de tal manera que no sufra daños en su estructura durante el proceso de empaque. Se decidió utilizar cartón microcorrugado como tipo de empaque para la protección externa, y cartones internos, para la separación de las cabezas florales de rosa, en grupos de ocho unidades, acorde con la exigencia de empaque solicitada por algunos comercializadores.

### **9.4.1 Caracterización de los componentes de cada uno de los sistemas mencionados**

El proceso completo de poscosecha involucra desde el transporte de los tallos florales cosechados hasta el refilado, para su posterior almacenamiento en los cuartos refrigerados. A continuación, se describen las etapas involucradas.

#### **9.4.1.1 Componentes del sistema de transporte de flores**

Motor eléctrico para movimiento de una cadena en un circuito cerrado desde cosecha hasta agrupamiento. Estructura de soporte del conjunto, conformada por: un marco en perfil IP; cuatro columnas para soporte del marco; cuatro engranajes plásticos para direccionamiento de la cadena; cuatro platinas de acero con ejes y chumaceras, para el soporte de los engranajes y del motor, y *trolleys* de transporte de los tallos florales.

#### **9.4.1.2 Componentes del sistema de clasificación**

Está conformado por una cámara industrial con procesador incorporado para la toma de imágenes y clasificación de las flores; soporte para la cámara; cable de comunicación entre cámara y computador; computador con *software* de programación e interfaces de programación y pantalla de iluminación.

#### 9.4.1.3 Componentes del sistema de agrupamiento y empaque

Actuadores neumáticos para extracción de los tallos florales desde el sistema de transporte hasta el organizador de estos; guías metálicas para el desplazamiento desde el sistema de transporte hasta el sistema de agrupamiento; organizador y agrupador de tallos florales que permite formar niveles de tallos florales para el empaque; cilindro rotatorio de apoyo para el organizador; actuador lineal para transporte del cilindro rotatorio y otros elementos.

Mesa de armado de ramos, compuesta por: preforma en C, para sostener el cartón microcorrugado externo; un cilindro neumático para el desplazamiento vertical de la preforma; sistema de bloqueo para mantener el ramo armado cuando se desplace hacia abajo la preforma, y sensores para el control del movimiento.

#### 9.4.1.4 Componentes del sistema de refilado

Regla de medición para definir la longitud del corte, disco de corte conectado a un motor eléctrico y estructura de soporte para el motor.

### 9.4.2 Generación de los criterios de diseño de cada uno de los sistemas mencionados

Los criterios considerados para el diseño se presentan a continuación.

#### 9.4.2.1 Sistema de transporte de tallos florales

Ergonomía, teniendo en cuenta la estatura promedio del trabajador colombiano con percentil 90 para la cómoda ubicación de los tallos florales en el *trolley*; modularidad, para la conexión de los diferentes subsistemas, y facilidad de ajuste de sus componentes.



Entre los componentes del sistema está el de agrupamiento y empaque, que utiliza entre otros, actuadores neumáticos para extracción de los tallos florales desde el sistema de transporte hasta el organizador de estos.







Se utilizó una cámara industrial Smart Camera 1776 de National Instruments, que inspecciona la longitud de un tallo de aproximadamente 1 m, a tasa de 15 imágenes por segundo, alcanzando la producción de 3600 tallos / h.

9.4.2.2 Sistema de clasificación

Velocidad de captura de imágenes y facilidad de programación y ajuste de parámetros.

9.4.2.3 Sistema de agrupamiento y empaque

Nivel de respuesta al paso de los tallos florales, para su adecuada ubicación según el grado de clasificación; trato amable con el tallo floral, para no causar daños durante la manipulación; capacidad de almacenamiento de hasta 24 tallos florales, y operación manual para el doblado del cartón de embalaje y su grapado.

9.4.2.4 Componentes del sistema de refilado

Ajuste para el corte de los tallos florales a la longitud requerida y seguridad en la operación.

9.5 Diseño a nivel del sistema

9.5.1 Definición de las dimensiones generales de cada una de las etapas del proceso

9.5.1.1 Sistema de transporte de tallos florales

Dimensiones de 2 m de largo × 1 m de ancho × 1,8 m de alto, teniendo en cuenta las dimensiones del cuarto habilitado para este proceso, y separación entre *trolleys* de 0,25 m.

9.5.1.2 Sistema de clasificación

Área de captura para imagen de tallos florales de 1,2 m de alto × 0,3 m de ancho; distancia entre cámara y tallo floral aproximada de 0,7 m; altura de ubicación de la cámara 1,4 m, y distancia entre la cámara y el panel de iluminación de 0,8 m.

9.5.1.3 Sistema de agrupamiento y empaque

Altura máxima de 2 m y altura de las mesas de 0,8 m.

#### 9.5.1.4 Sistema de refilado

Integrado al sistema de empaque.

### 9.5.2 Evaluación de diferentes alternativas de diseño para cada uno de los subsistemas del proceso de poscosecha

#### 9.5.2.1 Transporte de flores

Para la selección del sistema de transporte se analizaron los diferentes sistemas de transporte aéreo existentes, determinando sus ventajas y desventajas con el fin de evaluar el que mejor se adapte a las condiciones en las que se deben transportar los tallos florales de rosa. Teniendo en cuenta sus componentes, distancia de trabajo, facilidad y costo de instalación, se selecciona el transportador de cadena o cable.

#### 9.5.2.2 Clasificación de flores

La primera etapa de adquisición y digitalización correspondió a la selección de la cámara y el sistema óptico, para lo cual fue indispensable tener en cuenta características tales como: distancias de trabajo, tamaño del elemento que se va a medir y especificaciones de la tecnología.

Criterios de selección: distancia de trabajo de 0,6 m; longitud del tallo floral de rosa, incluido el botón, de aproximadamente 1 m, y diámetro de la flor o cabeza floral de rosa cercano a 0,055 m; no incluye follaje.

##### 9.5.2.2.1 Selección de cámara

Se seleccionó una cámara industrial Smart Camera NI 1776 de National Instruments, que permite cubrir en la inspección la longitud total de un tallo floral de rosa de aproximadamente 1 m. Tiene una tasa de inspección de 15 FPS, lo que significa que puede capturar 15 imágenes por segundo, cubriendo la producción ideal propuesta inicialmente de 3600 tallos florales por hora, y dando un umbral para ajustarlo según la producción.



#### 9.5.2.2.2 Selección del lente

La Smart Camera NI 1776 tiene un sensor Sony ICX274AL, con un formato de 1/1,8". Para este sensor, se selecciona un lente de 3,5 mm, correspondiente a una distancia focal de 3,5 mm, un ángulo de visión de 102,8°, distancia de trabajo de cero a infinito y distancia focal fija.

#### 9.5.2.2.3 Campo de visión

Se estableció el ángulo de visión horizontal y vertical de la aplicación, con el cual se determinó el campo de visión horizontal en 1206,857 mm y el campo de visión vertical en 905,142 mm.

#### 9.5.2.2.4 Iluminación

Se seleccionó el sistema de iluminación posterior difusa, por sus características de resaltar la geometría del objeto; de igual manera, se escogió un panel de luz LED de dimensiones 0,3 m × 1,2 m, que permitió cumplir con las especificaciones de diseño en cuanto a dimensiones, intensidad lumínica, color, funcionalidad y forma de montaje.

### 9.5.3 Sensores y actuadores

En la selección de los sensores y actuadores se tuvieron en cuenta las condiciones de operación del sistema, es decir, su ubicación, fuentes de alimentación de energía cercanas, condiciones ambientales, entre otras. Se identificó que los tallos florales de rosa se almacenan en el cuarto de poscosecha a temperatura ambiente, aproximadamente 14 °C, en un sistema de transporte en donde se posicionan de forma vertical.

#### 9.5.3.1 Sensor de presencia

Su función es detectar el paso de los tallos florales de rosa frente a la cámara. Si detecta la presencia del tallo floral, se activa la adquisición de la imagen y continúa con el procesamiento; adicionalmente, se instaló este mismo tipo de

sensores para captar el tallo floral cuando pase frente a los actuadores, como sistema redundante para el control. Se seleccionó el sensor capacitivo CBN15-18GS75-E2-v1 de la marca PEPPERL+FUCHS, el cual maneja una distancia de medición de 2 a 15 mm, con una tensión de trabajo de 10 a 30 V, con grado de protección IP67.

### 9.5.3.2 Actuador para clasificación

Para cada grado de calidad en el proceso de clasificación se implementó un actuador; por tanto, se instalaron tres actuadores, los cuales fueron ubicados en la línea de transporte. En la figura 9.1A se indica la posición de dichos cilindros con las letras A, B y N, representando los grados de calidad tipo A, tipo B y Nacional.

Se seleccionó como actuador un cilindro de simple efecto con paleta, con una carrera aproximada de 50 mm, proporcional a las dimensiones del *trolley*. Se escogió el cilindro de simple efecto con tope elástico CG1LN20-50S Z, diámetro de 20 mm y carrera de 50 mm con retorno por muelle, a presión mínima de operación 1,8 bar, de operación 7 bar y con velocidad promedio del émbolo de  $525 \text{ mm s}^{-1}$ . Para controlar estos cilindros se emplearon electroválvulas 3/2.

### 9.5.3.3 Sistema de recepción de tallos florales de rosa

Activado el cilindro de selección, el tallo floral se desplaza por medio de una bajante hasta un mecanismo lineal de pines y engranaje, que empuja el material vegetal hacia un acumulador de tallos florales de rosa en la etapa de empaque, para luego ser agrupadas.

## 9.5.4 Agrupamiento

Los tallos florales se organizaron en tres secciones, con dos niveles cada una, almacenando cuatro flores por nivel, para completar el ramo de 24 flores.



Los sensores de presencia detectan el paso de tallos florales frente a la cámara y activan la adquisición de la imagen para su procesamiento; así mismo, registran el paso de los tallos florales frente a los actuadores.





El sistema de desplazamiento cartesiano realiza movimiento en tres ejes y con el funcionamiento del sistema de empaque se estableció un tiempo de 27 s; un tiempo de sujeción y espera de 18 s, para un ciclo total de 45 s.

### 9.5.5 Embalaje

Se consideró un sistema cartesiano de la empresa comercial Festo, para posicionar el tallo floral, permitiendo formar el ramo. Para lograrlo, fue necesario el diseño de una pinza como elemento terminal para la manipulación del cartón interno y las flores.

#### 9.5.5.1 Pinza dosificadora de tallos florales

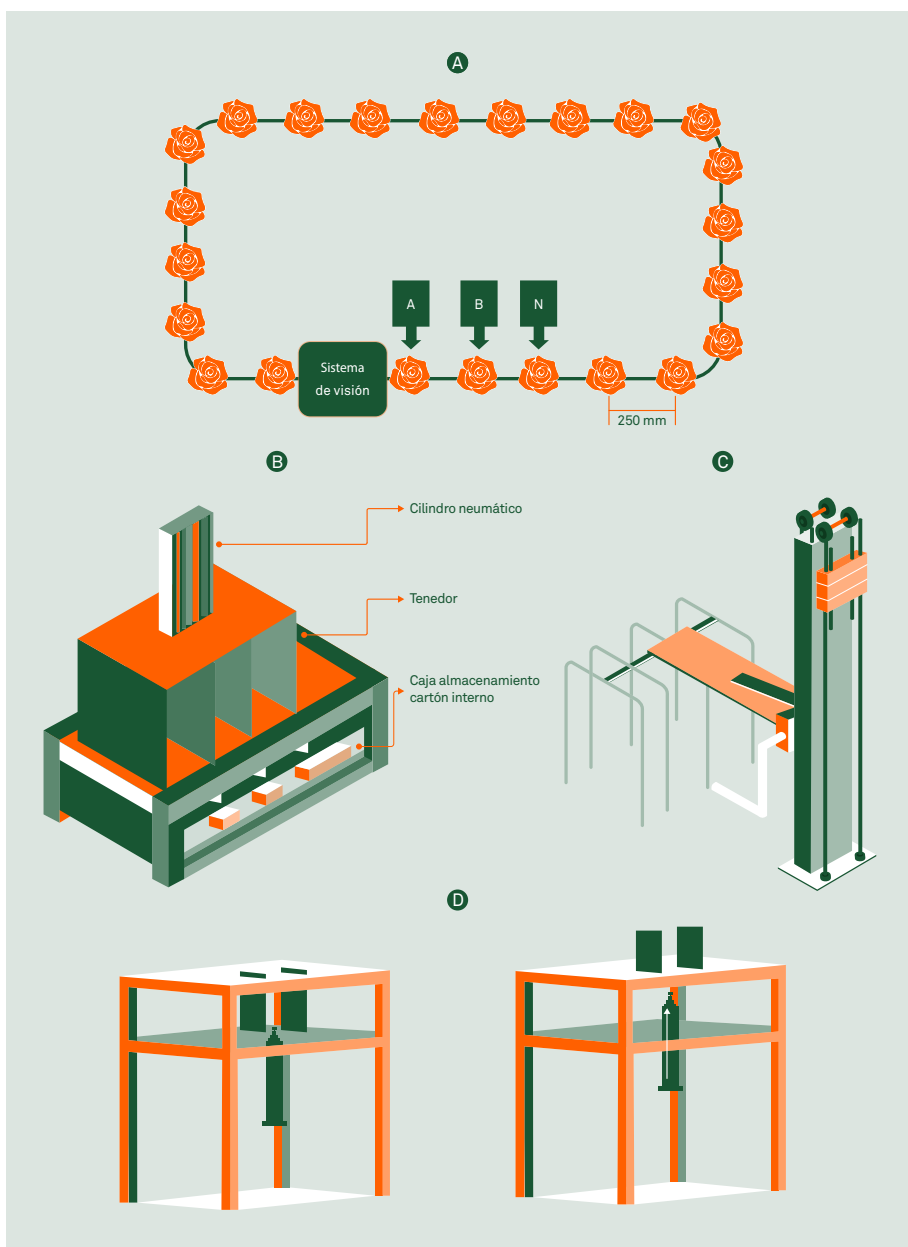
Es el elemento móvil del sistema cartesiano y del sistema de empaque. Sus funciones son: (i) dar forma en U al cartón externo; (ii) obtener, desde el dosificador de cartón interno, las unidades de cartón para que sea la base para la recolección de tallos florales, y (iii) recolectar los tallos florales desde el sistema anterior y dosificar su suministro durante el proceso de empaque.

#### 9.5.5.2 Sistema de desplazamiento cartesiano

Este sistema realiza el movimiento en los tres ejes, por acción de un sistema cartesiano marca Festo. Su funcionamiento inicia con el desplazamiento hacia la banda de empaque para formar el cartón externo en U; luego se desplaza al dosificador del cartón interno, toma una unidad, se desplaza para recibir los ocho tallos florales desde el sistema anterior (dosificador de tallos florales); después, se desplaza a la banda de empaque para depositar el nivel de flores y repetirá este proceso tres veces para completar el ramo. En seguida, se reinicia el ciclo.

Con el sistema cartesiano y el funcionamiento del sistema de empaque se estableció un tiempo de desplazamiento de 27 s, correspondiente a la suma de todos los ítems por tres ciclos; es decir, este proceso se repite tres veces; un tiempo de sujeción y de espera de 18 s, para una duración total de ciclo de 45 s.

➔ **Figura 9.1** **A.** Ubicación del sistema de visión y actuadores que ubican a las rosas según su clasificación; **B.** Alimentador de cartones internos. La caja de almacenamiento contiene los cartones que se ubican adecuadamente en el almacenador de rosas, por medio del tenedor que los empuja; **C.** Pasadores móviles verticales; **D.** Mesa con preforma para el ramo de tallos florales de rosa. Cuando el cilindro y preforma están arriba, esta soporta el cartón externo y el organizador coloca las rosas para su envoltura.



### 9.5.5.3 Subsistema de cartón interno

Está ubicado en la parte superior de la estructura del organizador de tallos florales de rosa, en el cual se colocan las flores para formar el ramo, y suministra los cartones internos de separación de cabezas florales, cuyas dimensiones son: 170 mm de alto  $\times$  130 mm de ancho y 2 mm de espesor (figura 9.1B).

### 9.5.5.4 Subsistema del organizador de rosas

Para la realización automática del proceso, desde la dosificación de los tallos florales de rosa hasta la formación, posicionamiento del ramo y su posterior cierre manual, se tienen en cuenta tres movimientos: primero, llenado del organizador, en posición vertical, con tallos florales de rosa, formándose así un ramo; segundo, movimiento giratorio de 90° del organizador con las flores, posicionándose horizontalmente el conjunto del organizador en la mesa de empaque ubicada al lado derecho, y tercero, retiro del organizador, dejando los tallos florales de rosa en la mesa con la preforma y cubierta exterior. Es de anotar que la mesa cuenta con un sistema neumático preconfigurado del cartón corrugado y soporte del ramo de rosas preformado (figura 9.1D).

### 9.5.5.5 Retiro del organizador

Cuando el organizador de flores de rosa se encuentre encima de la mesa de empaque, el operario debe sujetar el conjunto de rosas y cartones, para que, de esta forma, el mecanismo se desplace y la estructura del organizador de flores de rosas, ya vacío, vuelva a su posición inicial y realice una vez más la dosificación para la elaboración de un nuevo ramo. Para la realización de esta acción se cuenta con un sistema de pasadores móviles verticales que impiden que el conjunto de flores se desplace nuevamente con el organizador y se desarme, cuando este se retira (figura 9.1C). Este sistema es manipulado manualmente por el operario. Para facilitar su uso posee un contrapeso en la parte posterior.

#### 9.5.5.6 Subsistema de dosificar cartón externo

Debido a que los empresarios son quienes hacen la entrega del material por emplear para el empaque, según especificaciones, la máquina tiene que estar sujeta a recibir cualquier tipo de cartón o plástico PVC empleado y no ajustarse a una sola especificación. Se eligió que sea un operario quien ubique el cartón externo; en este caso, en la mesa de empaque se debe ubicar cartón microcorrugado de  $0,7 \times 0,3$  m.

## 9.6 Resultados relevantes

Se diseñó y construyó un sistema de transporte de tallos florales de rosa que permitió la ubicación de estos en los *trolleys* de forma segura y sin maltrato del material vegetal. Adicionalmente, fue posible controlar la velocidad de transporte, para ajustar el sistema a las necesidades de producción.

Se diseñó y construyó una máquina clasificadora de tallos florales de rosa para exportación que fue capaz de detectar las flores, tomar una imagen de cada una, procesar la información y permitir su clasificación de manera correcta, según los parámetros preestablecidos. Como este sistema se integró al sistema de transporte, fue posible el envío de cada tallo floral de rosa con un grado de calidad, a la sección correspondiente.

Se diseñó y construyó un sistema semiautomatizado de empaque de tallos florales de rosa, que permite la formación de ramos de rosas de 24 unidades, para su posterior colocación del empaque exterior y sellado manual. En la figura 9.2A se muestra el sistema automático de clasificación y empaque construido, y en la figura 9.2B, el tipo de ramo de flores armado.

323



Se construyó una máquina clasificadora de tallos florales de rosa para exportación, capaz de detectar las flores, tomar la imagen, procesar la información y permitir su clasificación, según los parámetros preestablecidos.



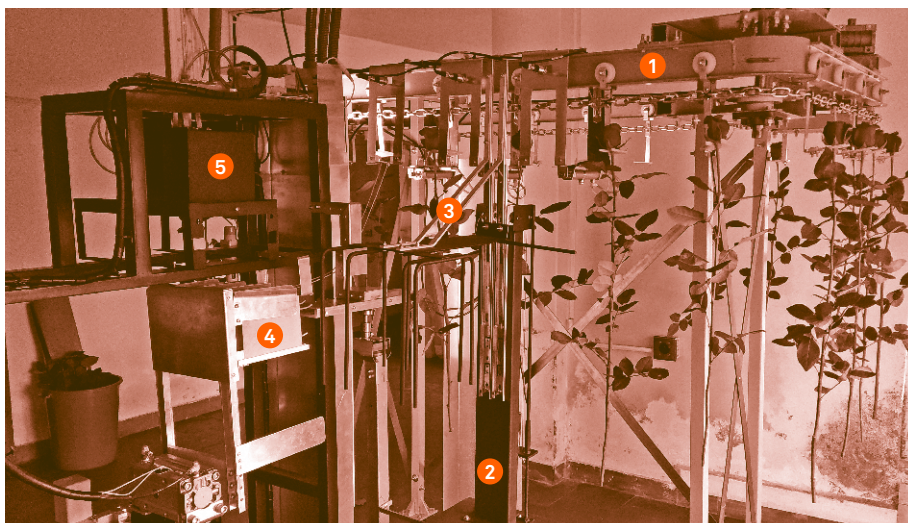


## 9.7 Conclusiones

- El diseño realizado fue capaz de responder adecuadamente a los criterios establecidos, incluyendo la posibilidad de clasificar hasta 3600 tallos florales de rosas en una hora.
- Se diseñó un sistema de transporte capaz de soportar las cargas aplicadas, utilizando materiales que se encuentran comercialmente, lo cual facilita su construcción y mantenimiento.
- El sistema eléctrico y de control permiten el ajuste de la velocidad de operación, en función de la cantidad de tallos florales de rosa por procesar, lo cual hace al sistema mecánico del sistema de clasificación un sistema ajustable de acuerdo con la demanda que se tenga en el mercado.
- El sistema de control efectúa la clasificación correctamente, actuando de acuerdo con las señales enviadas desde el sistema de visión de máquina y con los sensores del módulo de transferencia, con lo que la redundancia de señales trabaja de forma adecuada.
- El sistema de empaque cumple con los requerimientos inicialmente establecidos, lo que permite que este sirva de apoyo en la agroindustria de las flores de corte, para el empaque de flores cuando la mano de obra no esté en capacidad de realizarlo, ya sea por gran cantidad de órdenes de pedido o por insuficiencia.

➔ **Figura 9.2 A.** Sistema automático de clasificación y empaque de tallos florales de rosa construido: 1) sistema de transporte, 2) soporte de cámara para clasificación, 3) riel de transporte para almacenamiento de la flor clasificada, 4) sistema de almacenamiento y 5) sistema de suministro de cartones para separación de tallos florales; **B.** Ramo de flores elaborado con el sistema automático de clasificación y empaque construido.

A



325

B



## Agradecimientos

Los investigadores del Grupo AVARC de la Universidad de La Salle agradecen a las instituciones participantes: Asocolflores, Ceniflores, Universidad Nacional de Colombia, Universidad Jorge Tadeo Lozano, Agrosavia y, especialmente, a la Universidad de La Salle y a la Gobernación de Cundinamarca, por la posibilidad de participar como parte del Convenio Especial de Cooperación n.º 014 de 2015 para su ejecución en el marco del proyecto “Fortalecimiento de la competitividad del sector floricultor colombiano mediante el uso de ciencia, tecnología e innovación aplicadas en Cundinamarca”.

## Conflictos de interés y contribuciones de autoría

El manuscrito fue preparado y revisado de manera conjunta por los autores, quienes declaran no tener ningún conflicto de interés que comprometa la validez de los resultados aquí presentados.

## Referencias

- Beer, F., R. Johnston, J. Dewolf y D. Mazurek. 2010. *Mecánica de materiales*. 5.ª ed. México: McGraw-Hill. 791p.
- Bolton, W. 2013. *Mecatrónica. Sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica*. 5.ª ed. México: Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V. 648p.
- Castro, P.A. 2017. *Diseño de un sistema de identificación y clasificación de flores*. Trabajo de grado. Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia. Disponible en: [https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1000&context=ing\\_automatizacion](https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1000&context=ing_automatizacion); consulta: septiembre de 2020.
- Cely L., L. y R. Meneses M. 2005. *Diseño y construcción del sistema de transporte de la cuchara de fundición para la empresa Industrial de Accesorios Ltda*. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Disponible en: <https://>

- docplayer.es/amp/33355171-Diseno-y-construccion-del-sistema-de-transporte-de-la-cuchara-de-fundicion-para-la-empresa-industrial-de-accesorios-ltda.html; consulta: diciembre de 2019.
- Fenalco. 2017. Boletín sectorial flores n.º 46. Disponible en: <https://www.fenalcoantioquia.com/publicaciones/boletin-sectorial46>; consulta: diciembre de 2019.
- Fernández, A.C. 2015. La imagen: diseño y realización. Capítulo 3: las lentes u objetivos. Disponible en: [https://fido.palermo.edu/servicios\\_dyc/blog/docentes/trabajos/33773\\_116471.pdf](https://fido.palermo.edu/servicios_dyc/blog/docentes/trabajos/33773_116471.pdf); consulta: enero de 2020.
- González, R.C., R.E. Woods, F.D. Rodríguez y L. Rosso. 1996. Tratamiento digital de imágenes. Wilmington: Addison-Wesley; Madrid: Díaz de Santos. 800p.
- ProColombia. 2020. Oportunidades de negocio en el sector flores y plantas vivas. Disponible en: <http://www.colombiatrader.com.co/oportunidades/sectores/agroindustria/flores-y-plantas-vivas>; consulta: 17 de enero de 2020.
- Torres P., J.G. 2011. Manejo de flor cortada de acuerdo con los parámetros establecidos para satisfacción de los clientes. SENA. Mosquera, Cundinamarca. 52p. Disponible en: <http://es.slideshare.net/joguitopar/joguitopar-manejo-de-flor-cortada>; consulta: enero de 2020.
- Urrea R, D. y P.A. Torres P. 2008. Manual de procedimientos para el área de poscosecha de rosas de la C.I. Senda Brava Ltda. Trabajo presentado como requisito para optar al título de Administrador de Empresas Agropecuarias. Universidad de La Salle. Bogotá, Colombia.
- Valencia, J.D. 2013. Diseño de un transportador aéreo para material agrícola. Trabajo de grado. Tecnología Mecánica. Universidad Tecnológica de Pereira. Risaralda, Colombia.
- Vicente M., O.D. 2009. Diseño de un transportador aéreo capacidad 500 kg altura 300 metros, para la central hidroeléctrica Ing. Carlos Mora Carrión de la provincia de Zamora Chinchipe. Cuenca, Ecuador. Tesis de grado. Universidad Politécnica Salesiana. Cuenca, Ecuador. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/827>; consulta: enero de 2020.





## Transformamos de manera sostenible el sector agropecuario colombiano



**con el poder  
del conocimiento para mejorar  
la vida de los productores y consumidores.**



El campo  
es de todos

Minagricultura



CONTENIDO

**Contáctenos:**

**Teléfono Conmutador:** (+57 1) 422 7300

**Línea Gratuita:** 01 8000 121515

**Correo Institucional:** [atencionalcliente@agrosavia.co](mailto:atencionalcliente@agrosavia.co)



# 10

## CAPÍTULO



# Resultados de apropiación social de la ciencia, la tecnología y la innovación en el sector floricultor de Cundinamarca\*

Carlos Eduardo Rodríguez Muñoz<sup>1</sup> y Nelly Yolanda Russi Quiroga<sup>2</sup>

## RESUMEN

**Este capítulo presenta** los resultados de la estrategia de apropiación social de la ciencia, la tecnología y la innovación (ASCTI), del proyecto Fortalecimiento de la competitividad del sector floricultor colombiano mediante el uso de ciencia, tecnología e innovación en el departamento de Cundinamarca, desarrollado por Asocolflores y una red de cooperantes en 46 municipios del departamento durante el periodo 2015-2018. Para establecer estos resultados como ASCTI, se tomaron las cuatro líneas de desarrollo de la Estrategia Nacional de Apropiación Social de la CTeI (Colciencias, 2010), y desde la conceptualización y el alcance de cada línea se cruzaron los entregables del proyecto, los cuales se categorizaron dentro de cada una de ellas: participación ciudadana en CTeI, comunicación CTS, intercambio y transferencia del conocimiento y gestión del conocimiento para la apropiación social de la CTeI. Este ejercicio se llevó a cabo desde el marco conceptual

331

\* Para citar este capítulo: Rodríguez M., C.E. y N.Y. Russi Q. 2021. Resultados de apropiación social de la ciencia, la tecnología y la innovación en el sector floricultor de Cundinamarca. En: Flórez R., V.J. (ed.). Productos relevantes del proyecto Fortalecimiento de la competitividad del sector floricultor colombiano mediante el uso de ciencia, tecnología e innovación aplicadas en Cundinamarca. Bogotá: Ediciones Unisalle, Ceniflores. pp.330-345.

1. Comunicador social, Universidad Central de Colombia. Magíster en Comunicación y Medios, Universidad Nacional de Colombia. Doctor en Educación, Nova Southeastern University, Fort Lauderdale, FL, USA. Investigador principal del grupo Educación e Investigación Unbosque, Universidad El Bosque, Bogotá. Correo electrónico: cerodriguezm@unbosque.edu.co - orcid: 0000-0001-9464-9801.

2. Economista, Universidad Santo Tomás de Colombia. Especialista en Gestión para el desarrollo empresarial. Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación, Gobernación de Cundinamarca. Bogotá. Correo electrónico: nelly.russi@cundinamarca.gov.co - orcid: 0000-0002-0484-6666.





de los alcances y propósitos de cada una de las líneas de desarrollo de la apropiación social de la CTEI, y se relacionaron con los intereses de las políticas públicas del SNCTEI y con el enfoque misional de la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación del departamento de Cundinamarca, para finalmente reconocer los alcances de las actividades ASCTI del proyecto en mención. Se obtuvo como resultado que las actividades CTEI, cuando plantean desde su ideación la participación y colaboración de los actores del contexto de la práctica, alcanzan los objetivos de la ASCTI que facilitan la transferencia y apropiación de nuevos conocimientos y tecnologías.

**Palabras clave:** *nuevo conocimiento, participación, transferencia, comunicación.*

## ABSTRACT

**This chapter presents** the results of the ASSTI strategies (social appropriation of science, technology and innovation) of the project Strengthening the competitiveness of the Colombian flower sector through the use of science, technology and innovation in the Department of Cundinamarca developed by Asocolflores and a network of cooperators in 46 municipalities of the Department during the period 2015-2018. To establish these results as ASSTI, the four development lines of the National Strategy of Social Appropriation of STI (Colciencias, 2010) were taken, and from the conceptualization and scope of each line the project deliverables were crossed, which were categorized within each one of them: Citizen Participation in STI, CTS communication, knowledge management for appropriation and knowledge transfer and sharing. This exercise was developed from the conceptual framework of the scopes and purposes of each one of the lines of development of the social appropriation of STI and was related to the interests of the public policies of the SNSTEI and with the missionary approach of the Secretariat of Science, Technology, and Innovation of the Department of Cundinamarca. Finally, the scope of the ASSTI activities of the project in question was recognized. As a result, when the STI activities propose the participation and collaboration of the actors

in the context of the practice, they achieve the objectives of the ASSTI that facilitate the transfer and appropriation of new knowledge and technologies.

**Keywords:** *new knowledge, participation, transfer, communication.*





**La Secretaría de  
Ciencia, Tecnología  
e Innovación de  
Cundinamarca  
promueve  
mecanismos de  
apropiación social  
del conocimiento  
que permitan  
el avance de la  
innovación social  
y producción de la  
región.**

## Introducción

La ciencia, la tecnología y la innovación son procesos y desarrollos que están llamados a responder a las necesidades de contextos particulares, frente a la resolución de problemas que van a contribuir al fortalecimiento de las capacidades de competitividad y producción de los territorios y sus regiones (Colciencias, 2016).

De su capacidad para alcanzar no solo resultados enmarcados en la ciencia, tecnología e innovación (CTEI), sino en la apropiación social del conocimiento emanado de estas prácticas y desarrollos, va a depender que ese objetivo superior, de competitividad, alcance los estados de transferencia y empoderamiento necesarios para que un colectivo social adopte nuevas culturas y prácticas científicas y tecnológicas en sus actividades productivas (Neüman, 2008), siendo la apropiación un concepto que supera las expectativas mismas de los resultados de los ejercicios de investigación que se adelantan en diferentes tópicos y ámbitos de la nación.

La Ley 1286 de 2009, Política Nacional de Fomento a la Investigación y la Innovación, en su esencia asume los niveles de apropiación como la base del desarrollo de la CTEI y, a su vez, estas iniciativas como uno de los pilares para alcanzar el desarrollo sostenible de una región y de un país (UNDG, 2018).

Por su parte, la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación de Cundinamarca (SCTEI), única en el Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SNCTEI), entre sus objetivos misionales enmarcados en la ordenanza 0265 de 2016, en su artículo 103, numeral 6, señala: “Definir mecanismos de apropiación de la ciencia, gestión del conocimiento y transferencia tecnológica que permitan el avance de la innovación social y productiva que conlleve a la transformación social y económica de la región” (Gobernación de Cundinamarca, 2016), argumentando así la misión natural de esta secretaría, de promover y fortalecer las actividades asociadas a la CTEI, así como de priorizar la apropiación del conocimiento de resultados de estudios, investigaciones, desarrollos tecnológicos e innovaciones, como garantía para que exista una

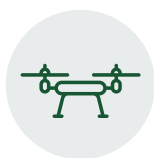
sinergia entre estos nuevos saberes y los ya existentes, incluso entre actores externos a estos desarrollos específicos.

Sin embargo, este diálogo entre expertos y la circulación de nuevos conocimientos han generado una problemática dentro de las comunidades no científicas, al encontrar dificultades para que todos los públicos interesados apropien los resultados obtenidos desde las diferentes investigaciones (García, 2019), especialmente por la desconexión entre la práctica científica y los saberes y las actividades tradicionales.

Algunas experiencias exitosas para disminuir esta tensión de saberes han buscado la integración de actores del contexto al proceso investigativo; es el caso del trabajo adelantado en Cuba bajo el título *La apropiación social del conocimiento en el uso racional del agua* (González-Pérez *et al.*, 2019), en donde sus autores identificaron unos indicadores para que suceda la apropiación, y señalaron que identificar actores, construir redes locales, crear emprendimientos, implementar nuevas tecnologías, capacitar y construir infraestructuras permiten tanto la transferencia como la apropiación, gracias a la integración de las prácticas participativas y colaborativas de los públicos no científicos a la investigación aplicada en sus contextos.

Es entonces la apropiación social del conocimiento científico y tecnológico un proceso de innovación, al posibilitar intencionalmente la incorporación de estos nuevos saberes a “la cultura y dinámicas regionales” (Colciencias, 2010), no solo como impulsores de los descriptores de un ecosistema de CTeI, sino como determinantes socioculturales que hagan posible una transferencia eficaz y eficiente, capaz de generar un desarrollo dialógico entre las diferentes formas de conocimiento que redunde en el avance productivo y económico de una región.

Esta dinámica de apropiación social de la ciencia, la tecnología y la innovación (ASCTI) va a tener como objetivo el impacto productivo y económico de un conglomerado social, al igual que el propósito mayor de mejorar la calidad de vida de los ciudadanos, al entender las transformaciones como un escenario de aprendizaje idóneo para impulsar el



Plantear la investigación con un diseño de tecnologías adaptadas a las condiciones de producción regional facilitó la apropiación social del conocimiento y su transferencia a situaciones reales.

conocimiento y la innovación (González-Pérez *et al.*, 2019), y así propiciar nuevas prácticas, productos e iniciativas empresariales.

Son entonces las actividades de CTEI las llamadas a dar respuesta a las necesidades en diferentes sectores que componen el aparato productivo y de conocimiento de un conglomerado social, lo que expone el requerimiento de generar nuevas relaciones entre saberes y realidad (Colciencias, 2016); estas deben impulsar no solo la investigación de nuevas prácticas y desarrollos tecnológicos, sino alcanzar el estadio de la transferencia desde las dinámicas de la apropiación de “el conocimiento como construcción social” (Colciencias, 2010).

Para De Greiff y Maldonado (2010), citados por Colciencias (2010), un desarrollo innovador se enmarca tanto en su capacidad tecnológica o desarrollo científico, como en la posibilidad de apropiación e incorporación de los resultados de estas investigaciones en las actividades cotidianas de una organización o grupo social, enmarcado en un sector de producción contextualizado desde las capacidades de CTEI de una región.

De ahí que este proyecto de investigación, Fortalecimiento de la competitividad del sector floricultor colombiano mediante el uso de ciencia, tecnología e innovación en el departamento de Cundinamarca, no solo se mide por los resultados alcanzados por los diferentes actores que intervinieron en él, sino por su capacidad para lograr el intercambio de conocimiento y relacionarlo con las dimensiones políticas y sociales del contexto donde se desarrolló.

## 10.1 Producción y productos como impulsores de las líneas de desarrollo de la ASCTI

Para poder describir el alcance de la ASCTI desde la ejecución del proyecto de investigación en mención, se tomó la estrategia general de los investigadores participantes, es de-

cir, la de parametrizar y evaluar las tecnologías intermedias existentes y por descubrir en el sector floricultor de Cundinamarca, entendiendo estas tecnologías como aquellas que van a determinar “lo que se va a producir, y cómo y dónde se va a producir, dónde vive la gente, quién trabaja y la calidad de las condiciones de trabajo; qué recursos se van a utilizar y qué sistemas de apoyo [...]” (McRobie, 2001), lo que significa el diseño de tecnologías adaptadas a las condiciones de producción regional.

Este tipo de intervenciones apuntaron al desarrollo económico del sector floricultor, con base en saberes y culturas de producción establecidos, con el aporte de una metodología de investigación participativa en donde se diseñó una investigación-acción, y con la implementación de los resultados sustentados y sistematizados desde las experiencias de los actores, beneficiarios y grupos de interés que participaron cíclicamente durante todo el proceso (Hernández, 2014). De ahí que las líneas de desarrollo de la ASCTI se establecieron desde un principio como un proceso de intercambio y construcción de nuevos saberes (Colciencias, 2016), con alcance de apropiación e implementación de estos en su cotidianidad para usos sociales y comerciales.

Para identificar las actividades de ASCTI del proyecto Fortalecimiento de la competitividad del sector floricultor colombiano mediante el uso de ciencia, tecnología e innovación en el departamento de Cundinamarca, se tomó como referencia el documento Estrategia Nacional de Apropiación Social de la CTEI (Colciencias, 2010), el cual define cuatro líneas de acción para que esta apropiación suceda, y las caracteriza de tal manera que las actividades de un proyecto pueden identificarse dentro de estas, teniendo en cuenta sus resultados y participantes.

### 10.1.1 Participación ciudadana en CTEI

Dentro de esta línea de desarrollo se concibe la participación como una acción intencionada y con un propósito definido, que se caracteriza por el intercambio de opiniones,



experiencias y prácticas de sujetos u organizaciones (Colciencias, 2010). Esto significa que los diferentes actores intervinientes se encuentran en un espacio heterogéneo, pero cohesionado por un interés y una necesidad de resolver o mejorar una situación problemática.

Por esto, la deliberación y la resignificación de las prácticas de producción del sector floricultor en Cundinamarca se acompañaron de los resultados de investigación donde se incluyeron expertos, académicos, productores y sujetos asociados a los contextos particulares, facilitando el empoderamiento y la toma de decisiones específicas, abriendo espacios permanentes y oportunidad de participación con capacidad deliberativa. En esta línea de desarrollo de ASCTI, “la noción de apropiación propuesta se mueve en tres niveles: interesarse/comprender, validar y utilizar” (Colciencias, 2010).

De ahí que la apropiación de nuevos sustratos en los cultivos, partiendo de insumos disponibles en la región como estrategia económicamente viable, es el resultado de la interacción entre los productores, la Universidad Nacional de Colombia y la Corporación Agrosavia, en la revalorización local de la fibra de coco como sustrato idóneo y la inclusión de la corteza de pino como componente de una mezcla potencialmente útil como sustrato hortícola. De esta manera se potenciaría el uso de dicha corteza para generar una nueva agroindustria proveedora de sustratos para la floricultura.

Igualmente, la conformación de redes de acción-participación dentro de los desarrollos y avances del proyecto facilitó la implementación de nuevas tecnologías, al hacer partícipes a los beneficiarios como agentes deliberativos, consultivos e implementadores de estas.

### 10.1.2 Comunicación CTS

Esta línea es vista como una mediación entre ciencia, tecnología y sociedad (CTS), entendida esta mediación como el escenario que da sentido a la comunicación (Martín, 1997), en donde las acciones van más allá de la presentación de trabajos unidireccionales, y las audiencias pasan a ser agentes

colaborativos en los diferentes materiales estratégicos planteados, con la finalidad de acercar la ciencia al aprender a hacer, apropiarse e implementar nuevos saberes.

Esta construcción de productos de comunicación CTS fue enmarcada desde una dinámica colaborativa en el desarrollo del proyecto, con la elaboración de artículos científicos que respondieron a temas asociados a situaciones experimentadas en el sector real y con sus beneficiarios, en donde las universidades de La Salle, Fundación de Bogotá Jorge Tadeo Lozano y Nacional de Colombia, así como el grupo de investigadores, dieron cuenta de resultados inmersos en el desarrollo del proyecto, convirtiéndose en actores sociales de la CTEI, más que en productores de artículos de resultados científicos.

De igual manera, para evitar que los beneficiarios no especializados deban apropiarse resultados finales desde el desconocimiento del contexto y proceso de estos (Colciencias, 2010), se generó una serie de documentos resultados del desarrollo de los diferentes estudios adelantados en la región, produciendo textos de consulta e implementación de mejoras en el ámbito de estructuras de costos, determinación de ingresos y análisis económicos y financieros que respondieron a las necesidades planteadas por el floricultor desde diferentes experiencias para potencializar la competitividad regional.

### 10.1.3 Transferencia e intercambio del conocimiento

El escenario de la transferencia e intercambio del conocimiento se ha visto como un reto para la producción científica, por el arraigo de prácticas y saberes tradicionales que generan tensiones con las nuevas prácticas y tecnologías propuestas; por esta razón, esta línea depende directamente de la participación ciudadana en CTEI y la comunicación CTS, pues su desarrollo efectivo va a permitir distensiones y que se asuma el término de apropiación “como motor de procesos significativos” (Dávila-Rodríguez, 2020).



La apropiación de nuevos sustratos, a partir de insumos disponibles en la región como estrategia económicamente viable, es el resultado de la interacción entre productores, la Universidad Nacional de Colombia y Agrosavia.





Mediante estrategias de días de campo y reuniones técnicas se asimilaron varias de las sugerencias propuestas por los técnicos del sector real; estas permitieron generar prototipos producto del ejercicio de contextualización y concertación que incentivaron la transferencia por ser acciones resolutive y aplicadas a realidades específicas, que respondieron al impacto que generó la investigación y que, por su naturaleza y metodología participativa, necesariamente facilitaron la transferencia y los intercambios de saberes empíricos y especializados.

Estos prototipos de invernaderos y fertirriego en diferentes campos experimentales son propios de una investigación participativa, en donde los laboratorios fueron cultivos reales y en procesos de producción, con lo cual, según Colciencias (2010), se logra desde la transferencia alcanzar un reconocimiento innovador.

### 10.1.4 Gestión del conocimiento para la apropiación

Finalmente, la gestión del conocimiento en este proyecto logró la vinculación de investigadores en formación doctoral y de maestrías, a través de la elaboración de trabajos de grado anclados a las necesidades y realidades del sector floricultor de Cundinamarca, en donde se permitió la aplicación del método científico desde la investigación-acción, para entender la ciencia como base del desarrollo y el crecimiento social, gracias a la interacción entre academia, sectores de producción y sociedad (Dávila-Rodríguez, 2020).

De igual manera, los talleres en modalidad de producción y visitas como jornadas de extensión académica del curso de sanidad vegetal, enfocados a ingenieros, agrónomos y productores, ampliaron el panorama de la apropiación significativa del conocimiento, desde nuevos escenarios pedagógicos que hicieron posible el aprendizaje para la vida (Díaz *et al.*, 2018), aplicando el paradigma de que el conocimiento cobra valor en la medida que este pueda ser aplicado para resolver problemas cotidianos.

Este tipo de acciones, además, permitieron la legitimación social de la ciencia y la tecnología del desarrollo del proyecto, al ser tomadas como un bien público que facilitó la incorporación de estos desarrollos tecnológicos a los saberes preexistentes, logrando así una emancipación en la transferencia de la CTEI (Dávila-Rodríguez, 2020).

Estas cuatro líneas de desarrollo de la Estrategia Nacional de la Apropiación Social de la CTEI se ven reflejadas en el componente tres del proyecto, el cual se denominó “Gestionar conocimiento científico sobre tecnologías aplicadas a la producción de flores”, en donde se contemplaron las siguientes actividades:

- Presentación de resultados al sector productor con sistemas de agricultura protegida.
- Promoción del desarrollo empresarial con las innovaciones generadas en el proyecto.
- Apoyo a la formación de especialistas.

## 10.2 Resultados relevantes

341

Para lograr identificar y evidenciar una relación entre productos de la investigación y las líneas de desarrollo de la ASCTI, se elaboró una matriz en donde por cada línea se identificaron descriptores que la caracterizaron. Esta serie de descriptores se construyeron desde la conceptualización de la propuesta de la Estrategia Nacional de Apropiación Social de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación (Colciencias, 2010).

En la tabla 10.1 se observa la ubicación de cada uno de los entregables frente a su impacto por línea de desarrollo y sus descriptores asociados, los cuales, a su vez, son acciones que caracterizan la ASCTI. Esto significa que los productos entregables del proyecto no se valoraron exclusivamente por la construcción de un nuevo conocimiento o desarrollo tecnológico, sino por su capacidad de incentivar la participación, la colaboración y la apropiación de los resultados obtenidos.

Con esta matriz se puso de manifiesto que las prácticas teóricas y científicas se armonizaron con los discursos y las



 **Tabla 10.1** Matriz de línea de desarrollo de ASCT y producción del proyecto de investigación.

LÍNEAS DE DESARROLLO	PRODUCTO/ENTREGABLE	DESCRIPTOR
Participación ciudadana en CTEI	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presentar una alternativa viable de sustrato que reemplace o complemente el uso de la cascarilla de arroz.</li> <li>• Crear un enlace con floricultores tradicionales dentro del método de investigación participativa, quienes participarán activamente del proceso de investigación y desarrollo de innovaciones.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Posibilita el intercambio de opiniones, visiones e informaciones.</li> <li>• Propende por la toma de acciones de grupos específicos.</li> <li>• Fomenta empoderamiento.</li> </ul>
Comunicación CTS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Publicación de seis artículos científicos (cuatro) nacionales y (dos) internacionales.</li> <li>• Documento con la estructura de los costos de producción de flores tradicionales con las tecnologías del estudio.</li> <li>• Documento con la determinación de los ingresos generados por la producción de flores tradicionales con los diferentes sistemas evaluados.</li> <li>• Documento con el análisis económico y financiero de los sistemas de producción de flores tradicionales con los desarrollos propuestos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transforma el tradicional imaginario de la CTEI.</li> <li>• Crea mediaciones y contenidos más problematizados, reflexivos, complejos y contextualizados.</li> <li>• Propende por facilitar el acceso público a los contextos, procesos y métodos de producción de CTEI.</li> </ul>
Transferencia e intercambio del conocimiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Seis prototipos de producción y aplicación en contexto del proyecto.</li> <li>• Promoción a mínimo tres empresas de base tecnológica del departamento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite el diálogo simétrico y reflexivo entre ciencia, tecnología y los contextos sociales, culturales y ambientales en donde se desarrolla.</li> <li>• Transfiere el “saber cómo” de los desarrollos de CTEI en sujetos y grupos sociales.</li> <li>• Hay coproducción entre diferentes actores.</li> </ul>
Gestión del conocimiento para la apropiación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tres talleres teórico- prácticos de producción.</li> <li>• Tres ideas de negocio formuladas.</li> <li>• Elaboración de cuatro tesis de maestría.</li> <li>• Elaboración de tres tesis de doctorado.</li> <li>• Apoyo de cuatro tesis de pregrado.</li> <li>• Formación y creación de contenidos académicos que serán aportados por las universidades y centros de formación superior.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Genera procesos sociales y organizacionales que permiten el uso de nuevos conocimientos como activos y capital.</li> <li>• Forma recursos humanos especializados en la mediación entre tecnociencia y sociedad.</li> <li>• Origina programas formales e informales de formación de mediadores en ciencia, tecnología y sociedad.</li> <li>• Promueve programas de posgrado en maestría y doctorados</li> </ul>

FUENTE: Elaboración propia.

actividades de la comunidad, lo que facilitó la apropiación de nuevos conocimientos y la circulación de estos en sus contextos (Rodríguez *et al.*, 2015), permitiendo así que la transferencia de los resultados de la investigación se relacionara con la cotidianidad de la población objetivo y sus prácticas productivas en el sector floricultor.

## 10.3 Conclusiones

La ASCTI deja de ser un proceso añadido a la producción científica, y se convierte en el escenario ideal para lograr la innovación desde la apropiación y transferencia de nuevo conocimiento, articulado con saberes y prácticas culturales en contextos particulares.

La Estrategia Nacional de Apropiación Social de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación presenta cuatro líneas estratégicas que deben converger y correlacionarse como un holismo, desde donde sus particularidades conforman un todo capaz de permitir la apropiación de la CTeI en comunidades no especializadas o ajenas a las dinámicas académicas y de los procesos de investigación.

El proyecto Fortalecimiento de la competitividad del sector floricultor colombiano mediante el uso de ciencia, tecnología e innovación en el departamento de Cundinamarca, adelantado por Asocolflores, logra dicha dinámica intencionada desde la generación de productos asociados a estas líneas, que dependen de la unidad de desarrollo tecnológico y científico del proyecto.

Finalmente, se hizo evidente que el enfoque de investigación-acción es idóneo para lograr la ASCTI en proyectos de investigación, al permitir el diálogo, la deliberación y la co-creación con sujetos u organizaciones en donde se desarrolla la investigación.

343



La apropiación social del conocimiento es el escenario ideal para lograr la innovación vía transferencia de nuevos conocimientos, articulados en contextos y saberes particulares.





**Las alianzas  
entre los sectores  
productivo,  
académico y  
público no solo  
impulsan el  
desarrollo regional,  
sino que mantienen  
en movimiento  
el ecosistema de  
ciencia, tecnología  
e innovación.**

## Agradecimientos

A la alianza con la Asociación Colombiana de Exportadores de Flores (Asocolflores), al Centro de Innovación de la Floricultura Colombiana (Ceniflores), a la Universidad Nacional de Colombia, a la Universidad de La Salle y a la Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.

## Conflictos de interés y contribuciones de autoría

El manuscrito fue preparado y revisado de manera conjunta por los autores, quienes declaran no tener ningún conflicto de interés que comprometa la validez de los resultados aquí presentados.

## Referencias

- Colciencias. 2010. Estrategia nacional de apropiación social de la ciencia, la tecnología y la innovación. Bogotá: Colciencias. 27p. Disponible en: [https://minciencias.gov.co/sites/default/files/ckeditor\\_files/estrategia-nacional-apropiacion-social.pdf](https://minciencias.gov.co/sites/default/files/ckeditor_files/estrategia-nacional-apropiacion-social.pdf).
- Colciencias. 2016. Catálogo de experiencias en ASCTI. Bogotá: Colciencias. 67p. Disponible en: <http://repositorio.colciencias.gov.co/handle/11146/791>.
- Dávila-Rodríguez, L.P. 2020. Apropiación social del conocimiento científico y tecnológico. Un legado de sentidos. *Trilogía*. 12(22):127-147. DOI: 10.22430/21457778.1522.
- Díaz, Y., M. Baena y G. Baena. 2018. Nuevos escenarios de aprendizaje, un reto pedagógico. Atlante: Cuadernos de Educación y Desarrollo. Disponible en: <https://www.eumed.net/rev/atlante/2018/05/nuevos-escenarios-aprendizaje.html>; consulta: junio de 2020.
- García, J.C. 2019. La comunicación de la ciencia y la tecnología como herramienta para la apropiación social del conocimiento y la innovación. *J. Sci. Commun.* 2(1):1-12. Disponible en: [https://jcomal.sissa.it/es/02/01/JCOMAL\\_0201\\_2019\\_Y02](https://jcomal.sissa.it/es/02/01/JCOMAL_0201_2019_Y02).

- Gobernación de Cundinamarca. 2016. Decreto de Ordenanza 0265 de 2016. pp. 68-78. Asamblea de Cundinamarca. Bogotá. Disponible en: <http://www.cundinamarca.gov.co/wcm/myconnect/f800f855-06bb-4eb6-a8a0-040550e62aa7/DECRETO+265+DE+2016+ESTRUCTURA+INTERNA+SECT+CENTRAL.pdf?MOD=AJPERES&CVID=lwrMNRQ>.
- González-Pérez, A.M., L.P. García-Hernández y Y. Barnes-Díaz. 2019. La apropiación social del conocimiento en el uso racional del agua. *Pedagogía y Sociedad*. 22(55):236-253. Disponible en: <https://core.ac.uk/reader/266978684>; consulta: junio 2020.
- Hernández, R.S. 2014. Metodología de la investigación. 6.<sup>a</sup> ed. México: McGraw Hill. 600p.
- Martín, J.B. 1997. De los medios a las mediaciones. 5.<sup>a</sup> ed. Bogotá: Nomos S.A. 351p.
- McRobie, G. 2001. Tecnología Intermedia. *Habitat*. Disponible en: <http://habitat.aq.upm.es/boletin/n20/agmac.html>; consulta: junio de 2020.
- Neüman, M.I. 2008. Construcción de la categoría “Apropiación Social”. *Quórum Académico*. 5(2):67-98. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=199016835004>.
- Rodríguez, C.E., G. Luis y Z. Reyes. 2015. Centro de producción radial de Altos de la Florida: un espacio para el desarrollo y cambio social. pp. 89-102. En: Rodríguez, C.E. (ed). *Altos de la Florida: La montaña invisible e imbatible*. 1.<sup>a</sup> ed. Bogotá: Uniminuto. 104p. Disponible en: <https://www.latinamerica.undp.org/content/rblac/es/home/library/poverty/altos-de-la-florida--la-montana-invisible-e-imbatible.html>.
- UNDG. 2018. Desafíos y estrategias para el desarrollo sostenible en América Latina y El Caribe. Grupo de la Naciones Unidas para el Desarrollo de América Latina y el Caribe. Panamá: ONU. 72p. Disponible en: <https://onu.org.gt/wp-content/uploads/2018/10/Desaf%C3%ADos-y-Estrategias-para-el-Desarrollo-sostenible-en-Am%C3%A9rica-Latina-y-el-Caribe-compressed.pdf>.





# Cundinamarca IMPULSA

la gestión del conocimiento



## 180 créditos

condonables para formación de alto nivel en maestrías y doctorados



## Cada una de las 15 provincias

con semilleros que impulsan y consolidan del conocimiento

# 1.000

## productores cundinamarqueses

se incorporan a procesos de ciencia y tecnología...



### Un sistema de ciencia, tecnología e innovación fortalecido



### Creación del primer índice provisional del ecosistema de CTel



### 250 empresas incorporan

sus procesos a la CTel



### Política pública de CTel actualizada

e incorporación de nuevos paradigmas de la cuarta Revolución industrial



**CUNDINAMARCA**  
**¡REGIÓN**  
**Que Progresa!**

Gobernación de  
Cundinamarca



CONTENIDO





**Optimización en el uso del nitrógeno** en la fórmula de fertirriego con miras a reducir el impacto ambiental

**Diseño de un prototipo de fertirriego** que permita hacer investigación en horticultura en áreas pequeñas

**Modificación del ambiente luminoso** con mallas fotoselectivas y su efecto sobre el desarrollo de las plantas



Con recursos del Sistema General de Regalías, a través de la Secretaría de CTeI de la Gobernación de Cundinamarca, el proyecto Fortalecimiento de la competitividad del sector floricultor colombiano mediante el uso de ciencia, tecnología e innovación aplicadas en Cundinamarca

abordó temas en sustratos, nutrición mineral, fertirriego, modificación del ambiente luminoso, diseño de una estructura de invernadero y automatización de procesos, indispensables para el desarrollo de la ciencia y la tecnología en el sector floricultor.

Para avanzar en las temáticas se conformó una alianza, liderada por Ascolflores, entre la Universidad Nacional, la Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, la Universidad de La Salle, Ceniflores y Agrosavia, con los resultados más significativos publicados en el presente libro.



ISBN: 978-958-5148-82-6



9 789585 148826

**CUNDINAMARCA**  
**¡REGIÓN**  
**Que Progresa!**  
EN CIENCIA E  
INNOVACIÓN



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
DE COLOMBIA

**ascolflores**

Asociación Colombiana de Exportadores de Flores

**Ediciones**  
**Unisalle**

**AGROSAVIA**

Corporación colombiana de investigación agropecuaria

**UTADEO**  
UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO



CONTENIDO